



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Aleš Petráň

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program 2341 B - Strojírenství

Materiály a technologie
Materiálové inženýrství

Hodnocení tribologických vlastností keramických materiálů

Classification of friction characteristics of ceramic materials



Aleš Petrání

KMT – B - 139

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Daniel Šída, *SGAC - Turnov*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Liška Miroslav, *SGAC - Turnov*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 53
Počet tabulek: 22
Počet obrázků: 30
Počet příloh: 2

Datum: květen 2009



Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ**

Katedra materiálů

ANOTACE

Studijní program:	2341 B – Strojírenství
Studijní obor:	Materiály a technologie
Student:	Aleš Petráň
Téma práce:	Hodnocení tribologických vlastností keramických materiálů Classification of friction characteristics of ceramic materials
Číslo BP:	KMT – B – 139
Vedoucí BP:	Dr. Ing. Daniel Šída, <i>SGAC - Turnov</i>
Konzultant BP:	Ing. Liška Miroslav, <i>SGAC - Turnov</i>



Abstrakt:

V dnešních konstrukčních řešeních se uplatňuje stále více použití technické keramiky, nebo použití technické keramiky ve styku s jinými materiály, např. ocelí. Tato práce si klade za cíl zjistit, jaké bude opotřebení, popřípadě chování materiálů ve styku ocel – keramika, což se týká tribologických vlastností, které souvisí s použitím materiálů ve finálním výrobku. Práce posuzuje vlastnosti jako závislost opotřebení keramických materiálů na čase, nebo závislost opotřebení keramických materiálů na jeho tvrdosti.

Klíčová slova:

keramika, tribologie, opotřebení

Abstract:

In present time more and more construct cases are based on application of technical ceramics, or application of technical ceramics in contact with some other materials, like steel. Main goal in this work is find out abrasion or behaviour of materials, like metal in contact with ceramics, which is important for friction characteristics, which affecting use of materials in final product. This work expertising characteristics, like dependance of abrasion of ceramic materials in time, or dependance of abrasion of ceramic materials on hardness.

Keywords:

ceramics, friction, abrasion



Poděkování:

Za veškeré konzultace týkající se problematiky práce a za umožnění použití mnoha přístrojů k měření děkuji především Ing. Miroslavu Liškovi. Poděkování rovněž směřuje k Dr. Ing. Danielu Šídovi, který dal celé práci směr a svými myšlenkami nedílně pomohl vzniku této bakalářské práce.

Poděkování také rovněž patří členům KMT za podporu a za umožnění studia v tomto zaměření.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: květen 2009

Podpis



OBSAH:

1	ÚVOD.....	10
2	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1	TRIBOLOGIE.....	11
2.1.1	TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI.....	12
2.1.2	KONTAKTNÍ PROCESY.....	14
2.1.3	KONTAKT MEZI KOVEM A KERAMIKOU.....	15
2.1.3.1	TRANSFEROVÝ FILM.....	16
2.1.3.2	ADHEZE.....	17
2.1.4	DRSNOST POVRCHU.....	18
2.2	DRUHY KERAMIKY.....	19
2.2.1	KERAMIKA OXIDOVÁ.....	19
2.2.1.1	VÝROBA OXIDOVÉ KERAMIKY.....	19
2.2.1.2	VLASTNOSTI OXIDOVÉ KERAMIKY.....	21
2.2.2	KERAMIKA NEOXIDOVÁ.....	22
2.2.2.1	VÝROBA NEOXIDOVÉ KERAMIKY.....	22
2.2.2.2	VLASTNOSTI NEOXIDOVÉ KERAMIKY.....	22
2.3	POUŽITÉ METODY PRO EXPERIMENT.....	24
2.3.1	METODA KALOTEST.....	24
2.3.2	POUŽITÉ METODY PRO VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	25
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	27
3.1	KALOTEST.....	28
3.1.1	DETEKCE METODIKY.....	28
3.1.2	EXPERIMENT POMOCÍ PŘÍSTROJE KALOTEST.....	37
4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	45
5	ZÁVĚR.....	52
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

σ	– normálové napětí	[MPa]
ε	– deformace materiálu	[%]
Ra	– drsnost povrchu	[-]
Al_2O_3	– oxid hlinitý (korund)	
ZrO_2	– oxid zirkoničitý	
CoO	– oxid kobaltnatý	
TiC	– karbid titanu	
TiN	– nitrid titanu	
D220;ATZ	– oxidová keramika – 90 % Al_2O_3 a 10 % ZrO_2	
T199R	– oxidová keramika – 99,2 % Al_2O_3	
T195R	– oxidová keramika – 95 % Al_2O_3	
Reynolds	– oxidová keramika – 99,96 % Al_2O_3	
TOSOH	– oxidová keramika - ZrO_2 – stabilizovaný ytriem	
D420	– neoxidová keramika - Si_3N_4	
D320	– oxidová keramika - Al_2O_3 + TiC	
Si_3N_4	– nitrid křemíku	
CBN	– kubický nitrid bóru	
SiC	– karbid křemíku	
B_4C	– karbid bóru	
BN	– nitrid bóru	
WC	– karbid wolframu	
TiB_2	– borid titanu	
ZrB_2	– borid zirkonu	
$MoSi_2$	– silikát molybdenu	
Sialon	– Si_3N_4 – Al_2O_3 – AlN	
F_{T1}	– třecí síla mezi keramickým vzorkem a koulí	[N]
F_{N1}	– normálová síla mezi keramickým vzorkem a koulí	[N]
F_{T2}	– třecí síla mezi unášivým hřídelem a koulí	[N]
F_{N2}	– normálová síla mezi unášivým hřídelem a koulí	[N]
F_G	– síla způsobená hmotností testovací koule	[N]
F_{G1}	– sinusová 35° síly F_G	[N]
F_{G2}	– cosinusová 35° síly F_G	[N]
M_T	– třecí moment, který koule překonává	[Nm]
M_K	– krouticí moment, který vytváří testovací koule	[Nm]



M_{KU}	– <i>kroutící moment, který vytváří unášivá hřídel</i>	[Nm]
r_k	– <i>poloměr koule</i>	[mm]
r_u	– <i>poloměr unášivého hřídele</i>	[mm]
α	– <i>úhel mezi rovinou svěráku a svislou osou</i>	[°]



1 Úvod

Pojem tribologie se poprvé objevil roku 1965 ve zprávě pracovní skupiny ustanovené britským Ministerstvem školství a vědy, kde byla tribologie definovaná jako “věda a technologie, která zkoumá vzájemné působení povrchu při jejich relativním pohybu a s tím spojená praxe “. Název má původ v řečtině – slova tribos a logos – dají se přeložit jako “věda o tření“. Vzájemná interakce povrchů dvou nebo více materiálů je spjata se vznikem pasivních odporů proti pohybu, které se označují jako tření. Důsledkem tření je vznik tepla, ale hlavně opotřebení, což je degradační proces vedoucí k úbytku materiálu z povrchu stykových ploch. Tření je spojené se ztrátou mechanické energie a opotřebení se ztrátou materiálu. Snížení tření je možné provést volbou mazání nebo volbou materiálů, které se navzájem tolik neopotřebovávají. Hlavní náplní tribologie je studium a popis tření, mazání a opotřebení s cílem využívat získané poznatky při řešení technologických a konstrukčních problémů.

V dnešní době, kdy se klade největší důraz na ekonomiku provozu jakéhokoliv zařízení, je nezbytné zajistit co nejmenší opotřebení materiálů a snížit ztráty třením tak, aby zařízení mělo co nejdelší životnost, bylo ekonomické a popřípadě průběžné způsobené opotřebení neovlivňovalo vlastnosti a chování zařízení.

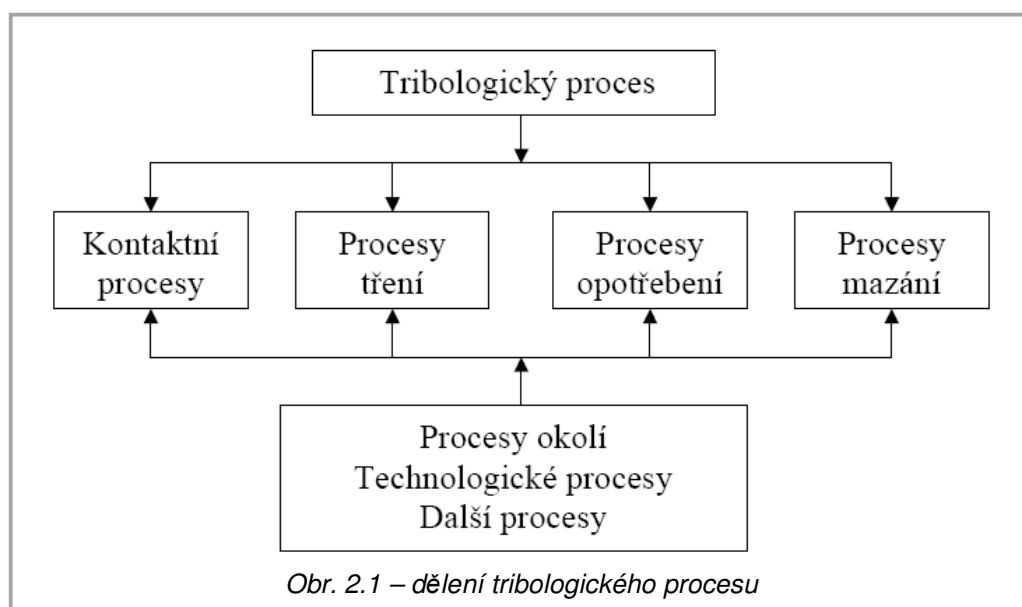
S tím souvisí tribologické vlastnosti, které se v této práci snažíme stanovit u keramických materiálů třením kontaktní dvojice ocel – keramika. Pomocí určené metodiky experimentu na přístroji **kalotest**, který slouží pro měření tloušťky prokalené či chemicky upravené vrstvy na povrchu součástí. Jedním z úkolů je hledat optimální kontaktní dvojici materiálů ocel – keramika s nejnižší možnou mírou opotřebení materiálu ve fyzikálním kontaktu. Optimální dvojice by měla být použita v konstrukčních řešeních, kde se fyzikální kontakt oceli a keramiky uplatňuje. Cílem bakalářské práce je stanovit rozdíly v míře opotřebení u různých druhů keramických materiálů za suchého tření bez použití maziva, které se potom vyhodnotí v závislosti na ostatních faktorech, které by měly tření ovlivňovat - jako tvrdost, drsnost povrchu apod.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TRIBOLOGIE

Je vědní obor, který se zabývá chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může být všeobecně kluzný, valivý, nárazový nebo kmitavý. Ve skutečnosti se však často uplatňují dva i více druhů pohybů současně. /1/

Tribologický proces charakterizují materiální interakce třecích těles, mezilátky a okolí, které probíhají v prostoru a čase. Obecné vazby mezi jednotlivými částmi tribologických procesů jsou znázorněny **viz obr. 2.1.** /1/

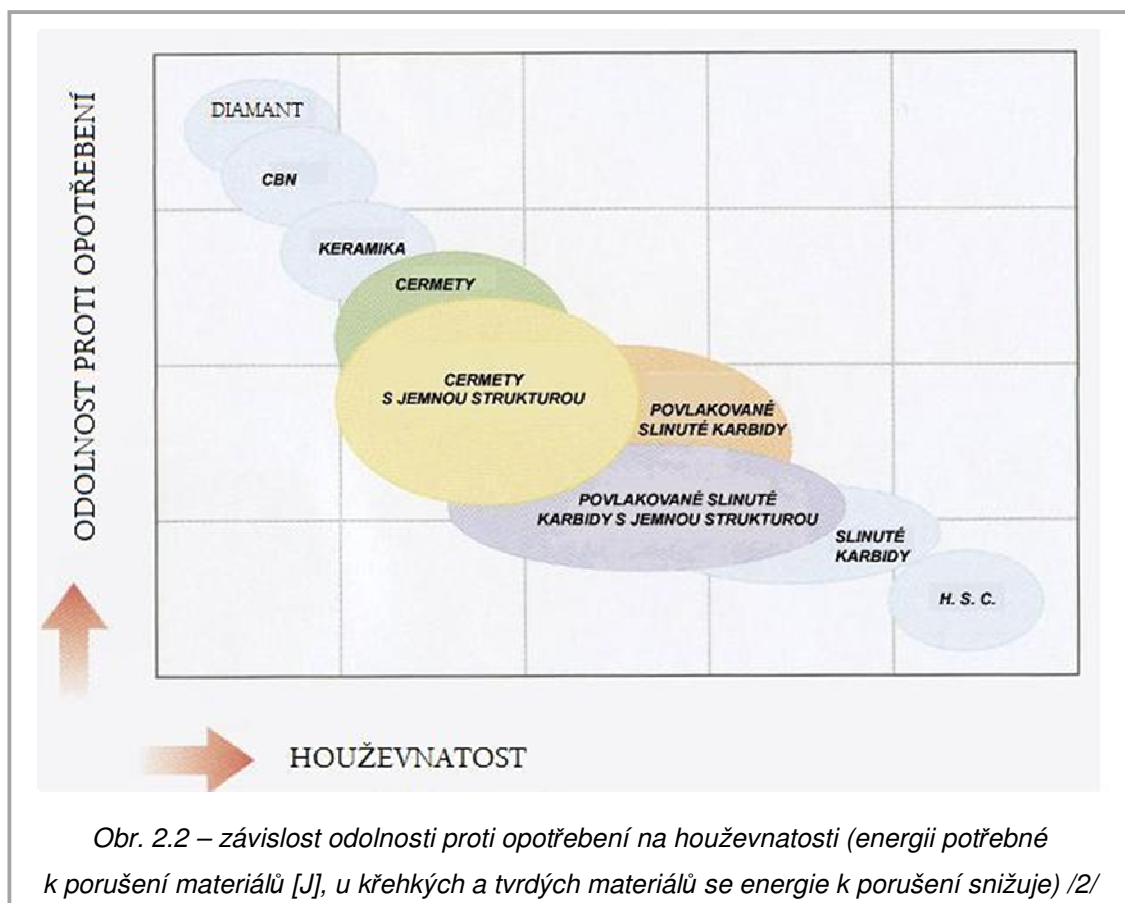


Tření a opotřebení je možné snížit volbou vhodného mazání. Při volbě mazání je nutné brát v úvahu pracovní podmínky. V praxi se často vyskytují případy, kde pracovní podmínky nedovolují použít klasický způsob mazání, či kapalinou nebo tuhým mazivem. Právě v takových případech se využívají povlaky a vrstvy nanesené na stykové plochy, u kterých jsou **tribologické vlastnosti viz kap. 2.1.1** přizpůsobené tak, aby se co nejvíce snížilo tření a opotřebení na stykových plochách. /1/

2.1.1 TRIBOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Tribologické vlastnosti lze označit jako skupinu vlastností, které umožňují vyhodnocovat děje, které probíhají v **kontaktních procesech viz kap. 2.1.2**. Jedná se o veškeré fyzikální ale i chemické reakce materiálu na jiné materiály, které jsou fyzicky v kontaktu. Podle materiálových veličin (mechanické vlastnosti, tvrdost) materiál reaguje s vnějším prostředím nebo s jiným materiálem.

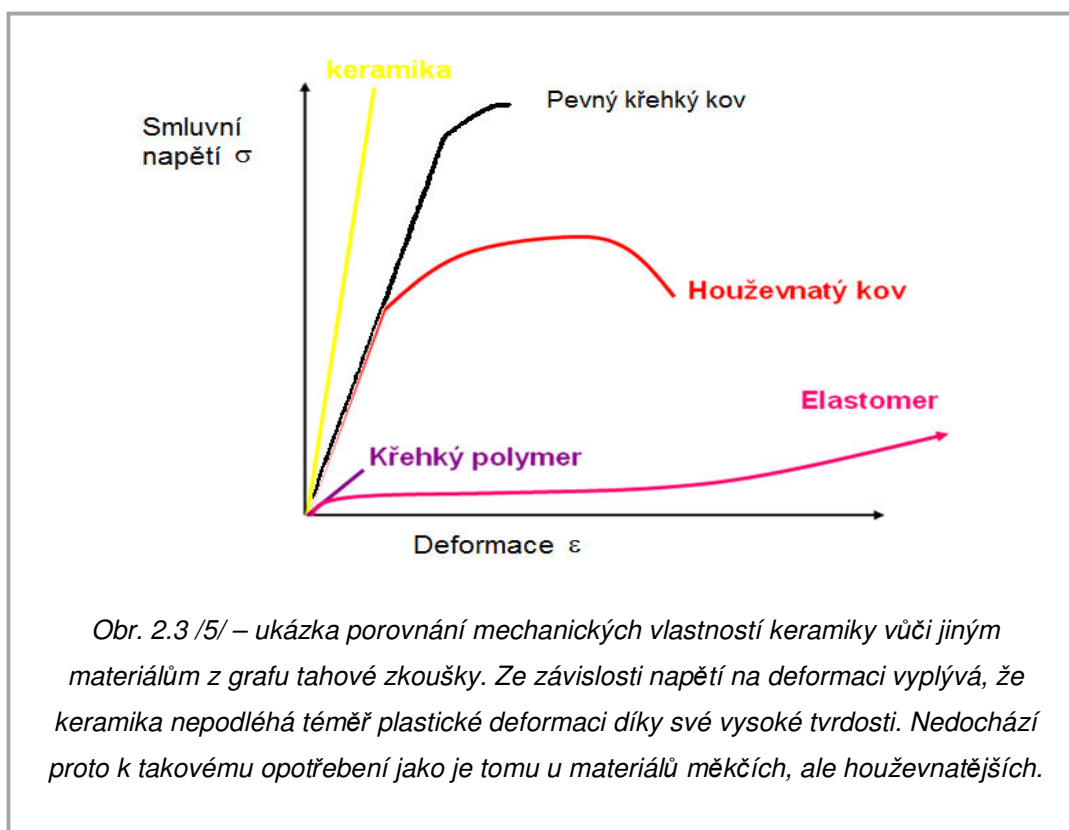
Velmi důležitou vlastností v tribologickém systému je tvrdost. Čím vyšší tvrdost, tím vyšší otěruvzdornost /3/ => vyšší **odolnost proti opotřebení viz obr. 2.2**. Tento poznatek však nelze aplikovat na tzv. uzly tření (tribologický systém), neboť zvýšení tvrdosti jednoho členu může vést k vyššímu opotřebení protiplochy. Opačný vliv má tvrdost na přizpůsobivost a schopnost pohlcovat drobné cizí částice /3/, materiál s rostoucí tvrdostí je také více křehký.



Tabulka 2.1 /2/ - pro srovnání fyzikálních hodnot a mechanických vlastností

řezný materiál	tvrdost	pevnost v tlaku	pevnost v ohybu	teplotní odolnost
	(HV)	R_{md} (MPa)	R_{mo} (MPa)	(°C)
rychlořezná ocel	750 - 800	2500 - 3500	2000 - 3000	560 - 610
slinuté karbidy	1300 - 2000	4000 - 5600	900 - 2200	900 - 1100
řezná keramika	2000 - 2800	3500 - 4500	450 - 1000	1300 - 1600
kubický nitrid bóru	4500	4000	600	1500
diamant	7000	3000	300	320 - 720

Z **tab. 2.1** můžeme vyčíst, že se zvyšující se tvrdostí materiálů klesají pevnostní hodnoty, avšak ne tak dramaticky jako poslední dvě skupiny, jako kubický nitrid bóru a diamant. To znamená, že keramiku lze cenově přijatelně využít i v oblastech konstrukce, protože při stejných hodnotách pevnosti v tlaku, jako mají poslední dvě skupiny, může odolávat více namáhání v ohybu a zachovává si tyto vlastnosti až do vysokých teplot (až 1600°C) a díky vysoké tvrdosti má také tato keramika velmi dobré tribologické vlastnosti – odolnost proti opotřebení.

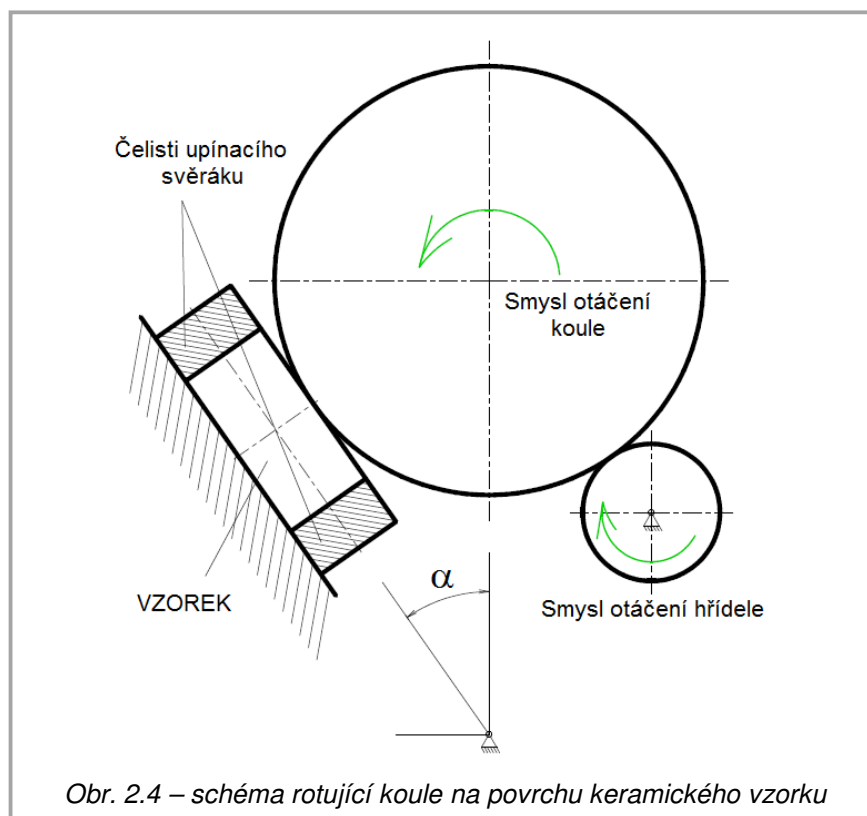


2.1.2 KONTAKTNÍ PROCESY /1/

Kontakt mezi jednotlivými členy tribologického systému je základním znakem chování tribologického systému. Při kontaktních procesech je třeba uvažovat se základními tvarově-rozměrovými a materiálovými vlastnostmi dotýkajících se částí, jejich vzájemnou vazbou a reakcích mezi nimi. Tyto interakce mohou být materiálové, fyzikální, chemické atd.. Vzhledem k velkému počtu kontaktních situací je třeba zvažovat řadu vlivů =>

- počet těles zúčastňujících se na kontaktním procesu
- tvar kontaktních těles a jejich **drsnost povrchu viz kap. 2.1.4**
- fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těles tvořící tribologický systém
- charakteristický druh deformace mezi jednotlivými tělesy
- typ a rychlost vzájemného relativního pohybu

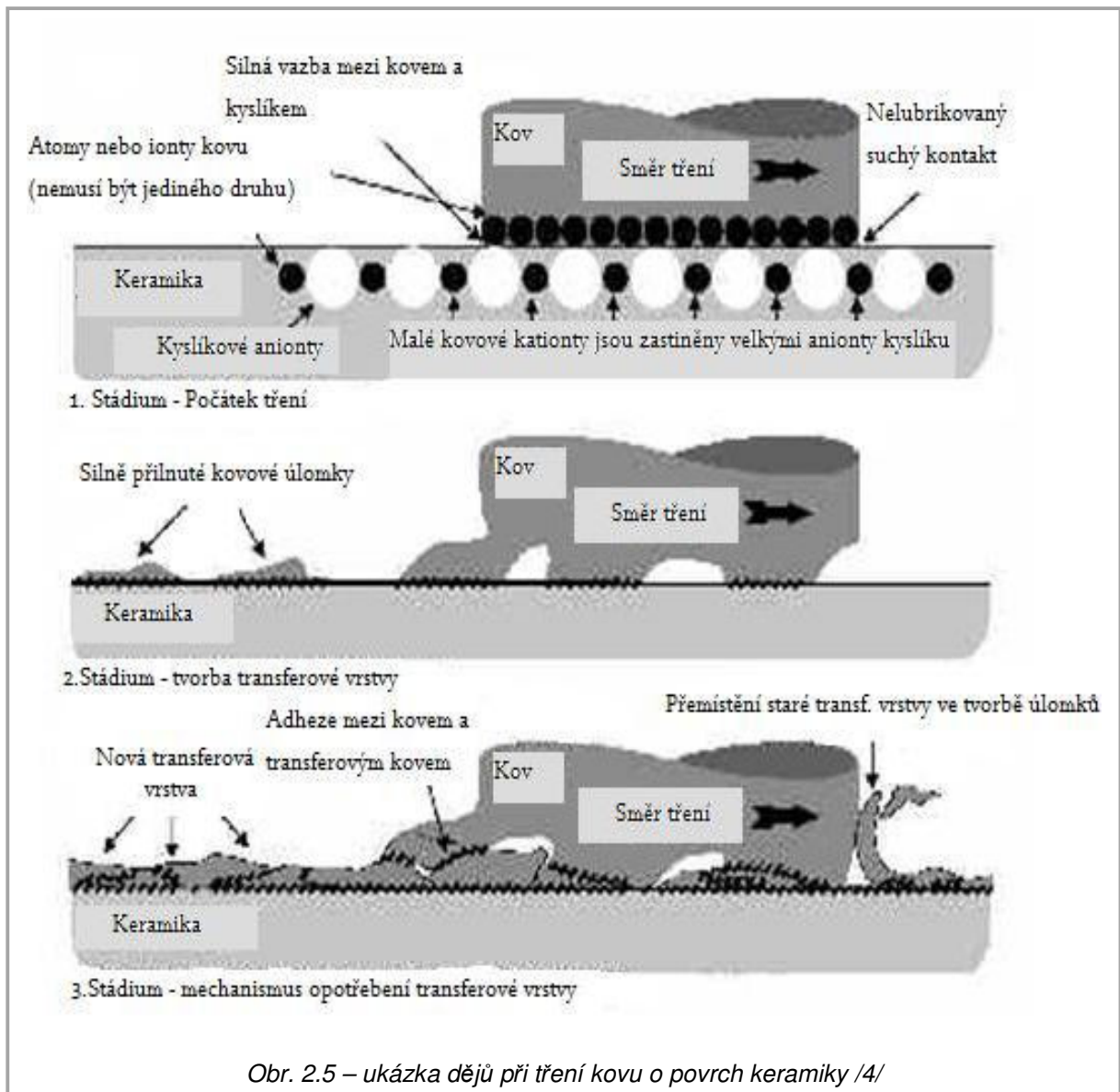
V našem případě budeme zkoumat působení fyzikálního kontaktu 2 materiálů (těles), přičemž se jedno pohybuje a druhé je v klidu – **kalotest** (experimentální část).





2.1.3 KONTAKT MEZI KOVEM A KERAMIKOU /4/

- Závisí na typu kovového protikusu a na podmínkách zatížení/rychlost tření
- kov se při tření přilepí na keramiku a vytvoří na ní **transferový film viz kap. 2.1.3.1**, tím se ovlivní výsledky
- většina kovů má ve srovnání s keramikou mnohem nižší hodnotu napětí při plasticko-elastické deformaci **viz obr. 2.3**
- nejdůležitější faktory - **adheze viz kap. 2.1.3.2** a tření mezi vzorky (závisí na houževnatosti daného kovu)

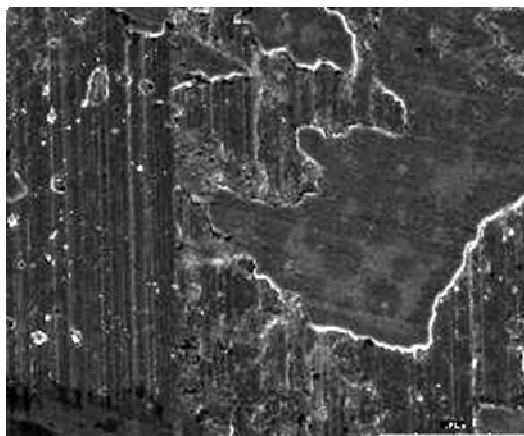


Obr. 2.5 – ukázka dějů při tření kovu o povrch keramiky /4/

- adhezi ovlivní přítomnost nečistot.

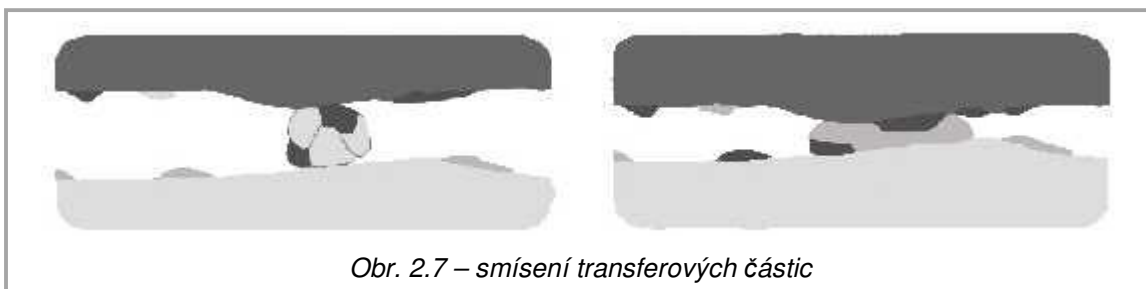
2.1.3.1 TRANSFEROVÝ FILM /3/

Transferový film odlišuje zřejmým způsobem adhezivní opotřebení od ostatních druhů opotřebení. První studie tohoto jevu byly věnovány mosazím, které se třely proti oceli a zanechávaly mosazný film na ocelovém povrchu. **Tvorba transferového filmu může mít dramatický vliv na rychlost opotřebení.**



Obr. 2.6 - transferový film

V případě, že se různé kovy pohybují navzájem po sobě, transferové částice se skládají z lamel dvou kovů viz obr. 2.7 – /3/ dochází tedy ke smísení dvou různých materiálů, což se u keramiky nestává, protože je podstatně tvrdší a nejde o kov.



Obr. 2.7 – smísení transferových částic

Transferové částice přenáší zatížení působící mezi povrchy a zároveň se množství částic, které přenáší výkon, zvyšuje se zatížením. Může dojít k rýhování povrchu těmito částicemi. /3/

2.1.3.2 ADHEZE /8/

Adheze (v obecném smyslu „přilnavost“) je schopnost materiálu (především dvou rozdílných materiálů) spolu přilnout (soudržnost materiálů se nazývá koheze), odborněji fyzikálně je to schopnost přenosu tečných sil ve styku dvou povrchů bez zřetelného pohybu. Adheze je také definovatelná odborně chemicky jako síla přilnavosti, mezimolekulární přitažlivé chemické a fyzikální síly na styčných plochách v



nerovnostech a pórech materiálů (Van der Waalsova síla). Van der Waalsovy síly jsou velmi slabé přitažlivé síly, které působí mezi nepolárními molekulami a jsou důsledkem vzniku okamžitého elektrického dipólu.

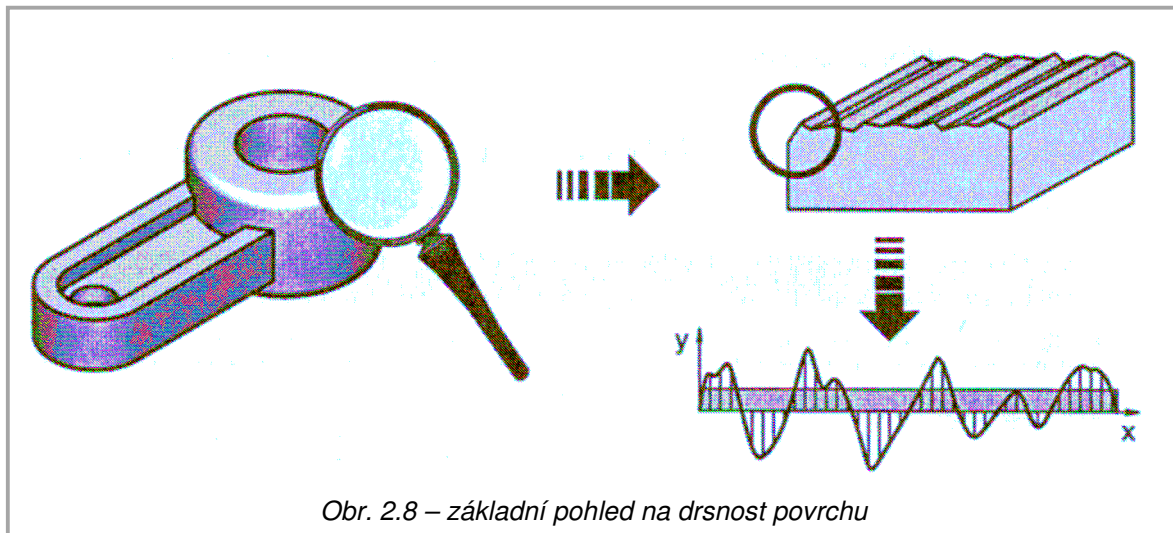
Základní mechanizmy (druhy) adheze jsou :

- mechanická adheze (suchý zip)
- chemická adheze (dva materiály vzájemně tvoří sloučeninu, a díky tomu drží pohromadě)
- disperzní adheze (Van der Waalsova síla)
- elektrostatická adheze
- difuzní adheze (polymery).

Například při obrábění dochází k adheznímu otěru nástroje, kdy se vytrhávají částice břitu obráběcího nástroje v důsledku adhezních spojů mezi nástrojem a materiálem obrobku.

2.1.4 DRSNOST POVRCHU

Vhodné opracování povrchu z hlediska jakosti povrchu snižuje tření v kontaktu s jinými tělesy a tím snižuje i ztráty třením způsobené. Můžeme tedy konstatovat, že vysoká kvalita povrchu pozitivně ovlivňuje tedy tribologické vlastnosti.



Jakost povrchu se volí s ohledem na funkci součásti. Můžeme rozdělit dva základní typy funkčnosti ploch /6/:

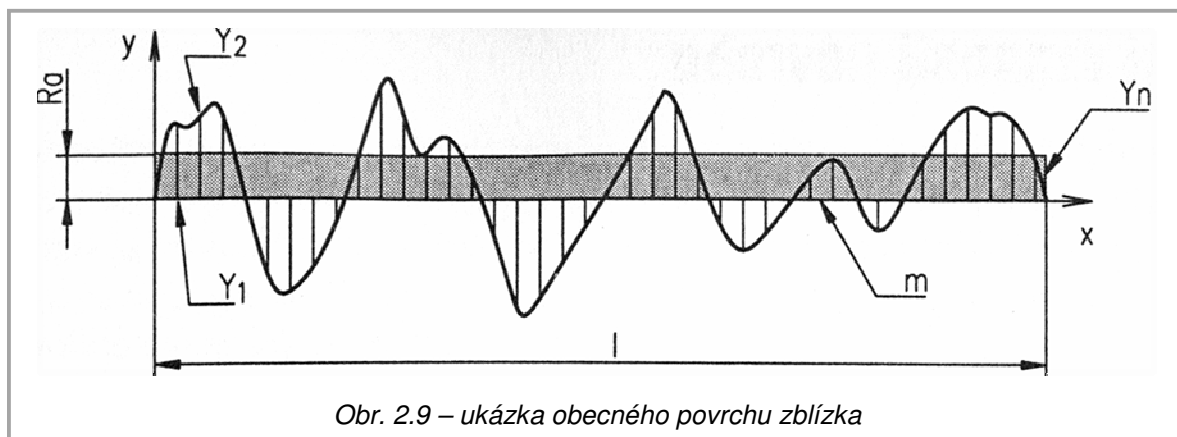
Plochy stykové /6/

- vzájemný styk dvou součástí
- jakost stykových ploch ovlivňuje funkci celku (ztráty, teplo způsobené třením...)
- například povrch čepu uloženého v kluzném ložisku

Plochy volné /6/

- nejsou ve vzájemném styku
- například vnější povrch víka spalovacího motoru

Hodnota drsnosti povrchu je závislá na metodě výroby, musí se tedy zvážit účelnost použití jednotlivých funkčních a volných ploch, protože vysoce kvalitní povrchy vyžadují speciální metody výroby a tedy i vysoké finanční náklady. /6/



V této práci použijeme pro experiment vzorky s povrchem leštěným a s povrchem neopracovaným. Pokusíme se také vyhodnotit tribologické vlastnosti na základě kvality povrchu vzorků keramiky.

2.2 DRUHY KERAMIKY

2.2.1 KERAMIKA OXIDOVÁ

Podle dalších příměsí může být čistá (např. 99,5 % Al_2O_3), polosměsná (např. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, nebo $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$), směsná (např. $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN} + \text{TiC}$). /2/

2.2.1.1 VÝROBA OXIDOVÉ KERAMIKY /2/

Postup výroby keramiky je srovnatelný v dílčích oblastech s výrobní technologií práškové metalurgie.

Výroba se skládá z těchto etap:

- příprava hmoty přesného složení, tj. mletí surovin, homogenizace, sušení
- tvarování
- lisování
- finální opracování



Technologický proces výroby oxidické keramiky lisováním může být trojí:

1. lisování za studena (proces podobný konvenční práškové metalurgii)
2. lisování za vysokých teplot - HP (Hot Pressing)
3. izostatické lisování za vysokých teplot - HIP (Hot Isostatic Pressing)

Lisování za studena se používá při výrobě čisté oxidické keramiky. Polosměsná a směsná keramika se nejčastěji vyrábí lisováním za tepla. Jemný prášek Al_2O_3 se získává rozkladem hliníkových solí, nejčastěji bauxitu a následným jemným mletím. Upravený prášek s aditivy pojiva je před lisováním předspékaný při teplotě 1350 - 1520 °C. Lisování probíhá při tlaku 20 MPa a teplotách 1500 - 1700 °C. Proces HIP probíhá při tlaku 160 MPa a teplotě 1450 °C. Směsná keramika se vyrábí smícháním jemného prášku Al_2O_3 s TiC, TiN práškem a následným lisováním při teplotách 1500 - 1800 °C a tlaku 20-40 MPa.

Čistá oxidová řezná keramika

S obsahem 99,5 % Al_2O_3 vyznačuje se vysokou tvrdostí, ořezuvzdorností a výbornou chemickou odolností a stabilitou při vysokých teplotách, vyskytuje se zde však nízká odolnost proti mechanickému a tepelnému rázovému zatížení a nízká ohybová pevnost. Je vhodná jen pro operace jemného dokončování. /2/

Polosměsná oxidová keramika

S obsahem ZrO_2 15 - 20 %, může obsahovat i jiné složky např. CoO. Oproti čisté keramice má vyšší pevnost. Přísada ZrO_2 a zdokonalení technologie výroby snižuje náchylnost proti lomu a zvyšuje houževnatost. /2/

Směsná oxidová keramika

S přísadami TiN, TiC je charakterizována vyšší odolností proti tepelným rázům, kterou zabezpečuje přísada TiC. Přísada TiN vylepšuje odolnost proti tepelným rázům a zároveň zvyšuje pevnostní vlastnosti. Dále tyto přísady zabezpečují stabilitu mechanických vlastností při vysokých teplotách. /2/

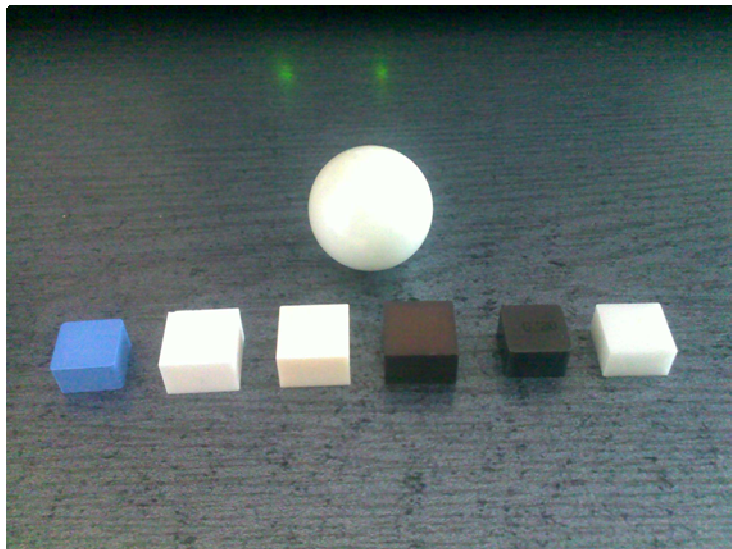
Kompozitní oxidová keramika

Zpevněná monokrystaly křemíku SiC, tzv. whiskery v matrici Al_2O_3 , která má rovnoměrnou jemnozrnnou strukturu. Úlohou SiC vláken je bránit šíření mikrotrhlin v základní matrici. Vlákná SiC mají průměr 0,1-1 μm a délku 5 -100 μm . Pevnost v tahu je 7 GPa, modul pružnosti 550 GPa. Zvyšují tvrdost za tepla a ohybovou pevnost. /2/

2.2.1.2 VLASTNOSTI OXIDOVÉ KERAMIKY /2/

- Nízká měrná hmotnost
- vysoká tvrdost i za vysokých teplot
- tepelná odolnost
- chemická stálost
- odolnost proti opotřebení – viz obr. 2.2

To zaručuje vysokou trvanlivost např. řezných destiček i při vyšších řezných rychlostech /2/. Nejširší uplatnění bychom tedy našli u korundové keramiky, kde se obsah Al_2O_3 pohybuje od 80 do 99 %. V technické keramice se jedná o materiál, který je velice odolný proti všem kyselinám a dalším vnějším vlivům a proti otěru a opotřebení. Tato keramika je velmi tvrdá (až kolem 1800 HV). Proto ji lze uplatnit nejen v obráběcím průmyslu, ale také v chemickém průmyslu, medicíně a mnoha jiných odvětvích. /2/



Obr. 2.10 – oxidová keramika pro experiment – zleva D220;ATZ (90 % Al_2O_3 +10% ZrO_2), T199R, Reynolds, T195R – Al_2O_3 s různými obsahy, D320 - Al_2O_3 +TiC, TOSOH. Kulíčka - ZrO_2



2.2.2 KERAMIKA NEOXIDOVÁ /9/

Neoxidová keramika zahrnuje karbidy, nitridy, boridy, silicidy atd. Mají široký rozsah aplikací od vysoce tvrdých abrasiv (B_4C , BN) a řezných nástrojů (WC), přes raketové trysky (TiB_2), elektrody pro tavení kovů (ZrB_2) až např. k topným článkům ($MoSi_2$). Nejdůležitějšími konstrukčními neoxidovými keramikami jsou karbid křemíku SiC , nitrid křemíku Si_3N_4 a tak zvané sialony, což je nitridová keramika s proměnlivým obsahem oxidů. Neoxidové keramiky musí být připraveny vysokoteplotními procesy v redukční nebo inertní atmosféře, aby se zabránilo oxidaci. Kromě toho, jejich pevnost a převládající kovalentní vazba zabraňuje migraci atomů (difúzi), takže slinování v pevném stavu je pod teplotou rozkladu (cca 2500 °C pro SiC , cca 1900 °C pro Si_3N_4) silně omezeno. Proto je pro zhutnění nezbytné slinování s kapalnou fází nebo speciální reakční techniky.

2.2.2.1 VÝROBA NEOXIDOVÉ KERAMIKY /9/

Převažující kovalentní charakter atomové vazby např. v Si_3N_4 zabraňuje migraci atomů. Při teplotách, které jsou vyžadovány pro pohyb atomů, již začíná rozklad, a proto je omezeno slinování v pevném stavu. Si_3N_4 (tzv. HP-SN) může být zhutněn žárovým lisováním při 15-30 MPa v grafitové, indukčně vytápěné trubici, v dusíkové atmosféře při teplotě 1550 - 1800 °C po dobu 1-4h.

2.2.2.2 VLASTNOSTI NEOXIDOVÉ KERAMIKY V POROVNÁNÍ S OXIDOVOU KERAMIKOU /2/

- nižší odolnost proti opotřebení
- nižší tvrdost
- vyšší pevnost v ohybu, odolnost vůči cyklickému namáhání
- vyšší tepelná vodivost, vyšší odolnost proti tepelným rázům
- vyšší houževnatost
- nižší chemická stabilita

Vzhledem k vysoké tvrdosti a odolnosti proti otěru je Si_3N_4 používán i jako abrazivo, na mlecí tělesa, řezné a brusné kotouče, na výstuhy a ústí, vzhledem k vysokoteplotní a chemické odolnosti na hořáky, svářecí trysky, tepelné výměníky a pálící pomůcky. Spojení nízké hustoty a elektrických vlastností dává aplikace např. v automobilovém průmyslu: části motorů (ventily, plynové turbíny, nosiče katalyzátorů, zapalovací svíčky). Konečně, vzhledem k dobré odolnosti proti teplotním rázům je používán na kelímky, kryty termočlánků atd. Sialony mají ve srovnání s Si_3N_4 vyšší houževnatost, chemickou stabilitu a slinovatelnost. Aplikace nalézají hlavně tam, kde je požadována vysoká otěruvzdornost [9], ale nutno podotknout, že otěruvzdornost je především závislá na tvrdosti a na typu třecího protikusu, tzn. keramika by se měla volit s ohledem na systém, ve kterém se bude provozovat.



Obr. 2.11 – neoxidová keramika – D420 - Si_3N_4

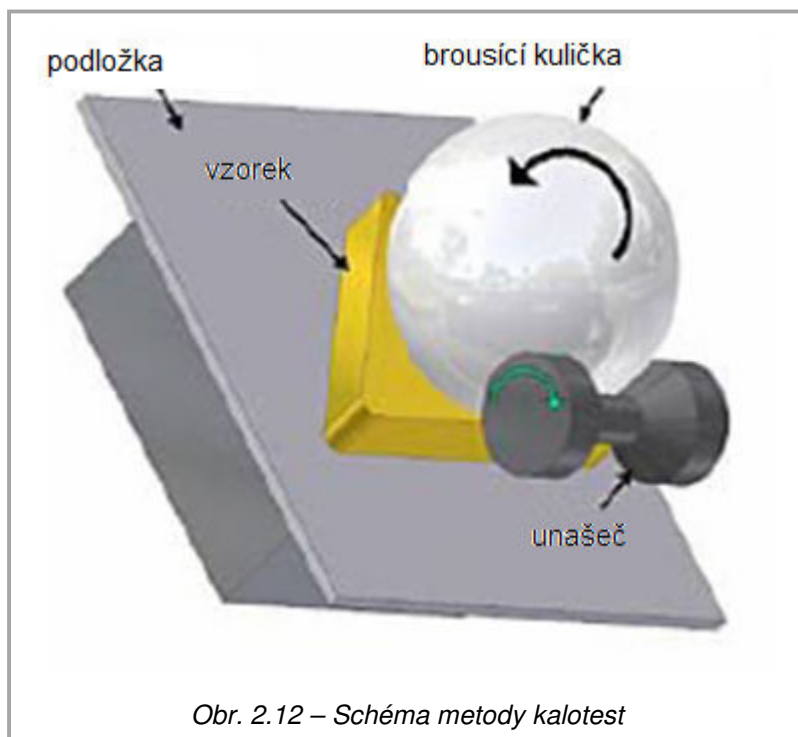
2.3 POUŽITÉ METODY PRO EXPERIMENT

V této kapitole se dále zmiňuji o metodách, pomocí kterých by měl být proveden experiment a co každý experiment obnáší.

2.3.1 METODA KALOTEST

Tloušťku tenké vrstvy lze měřit pomocí mikroskopu na metalografickém příčném výbrusu nebo pomocí metody označované „kalotest“, která je běžně používána pro rychlé a jednoduché stanovení tloušťky prokalené, resp. chemicky upravené vrstvy.

Princip metody – do vzorku se vybrousí kulový vrchlík, který se na průmětu jeví jako mezikružší, obvykle se používá otáčející se ocelová kulička o průměru 25 mm potřená brusnou diamantovou pastou. Mikroskopickým proměřením průměrů výbrusu lze získat příslušné rozměry umožňující vypočítat tloušťku posuzované vrstvy. Oblast použití je poměrně široká a to v rozmezí 1 - 100 μm . /10/

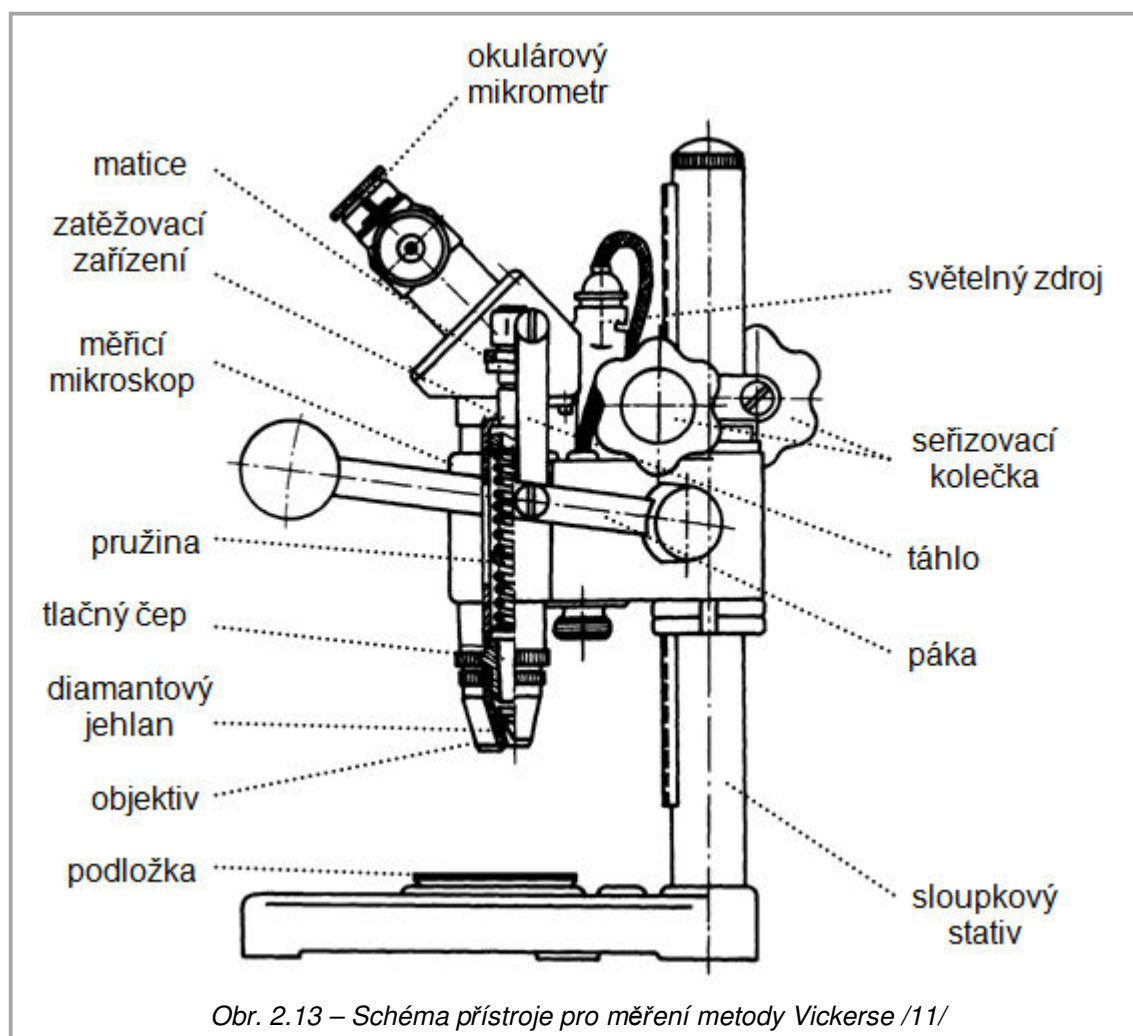


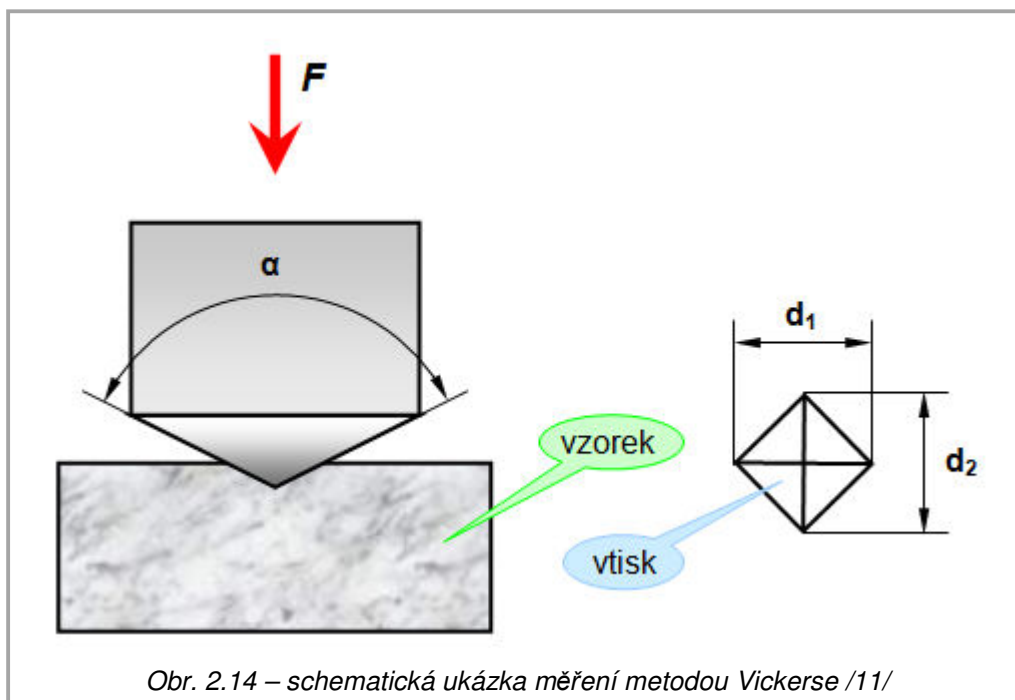
Metodu se pokusíme použít jako přístroj pro měření tribologických vlastností a to tak, že v různých časových intervalech budeme zkoumat velikosti výbrusů a poté vyhodnotíme velikost opotřebení.

2.3.2 POUŽITÉ METODY PRO VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Měření tvrdosti vzorků metodou Vickerse (tvrdost HV) /11/

Diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° je do zkušebního tělesa vtlačován zkušebním zatížením působícím v kolmém směru po stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčky vtisku. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. Pro tuto metodu platí norma ČSN EN ISO 6507.





Tryskání povrchu vzorků pískem (sandblasting)

Povrch testovaného vzorku se opotřebovává tak, že ze zásobníku, který se plní abrazivem (safírový písek) se tlakem skrz zúženou trysku prohání písek kolmo na povrch vzorku, který musí být perfektně naleštěný, aby se dala prokázat co nejpřesnější velikost opotřebení.

Měření specifické hmotnosti vzorků

- vzorec pro výpočet specifické hmotnosti vzorků

$$\rho = \frac{m}{V} [kg \times m^{-3}]$$



3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části se pokusíme stanovit různými metodami tribologické vlastnosti keramických materiálů. Na základě výsledků těchto metod provedeme diskuzi a výsledky vyhodnotíme v závěru práce. Cílem vyhodnocení, jak je popsáno v úvodu práce, je vybrat keramický materiál nejvhodnější pro fyzikální kontakt s kovem, z hlediska minimálního opotřebení v dvojici keramika a ložisková ocel (ČSN 14 209).



3.1 KALOTEST

3.1.1 DETEKCE METODIKY

Specifikace cílů:

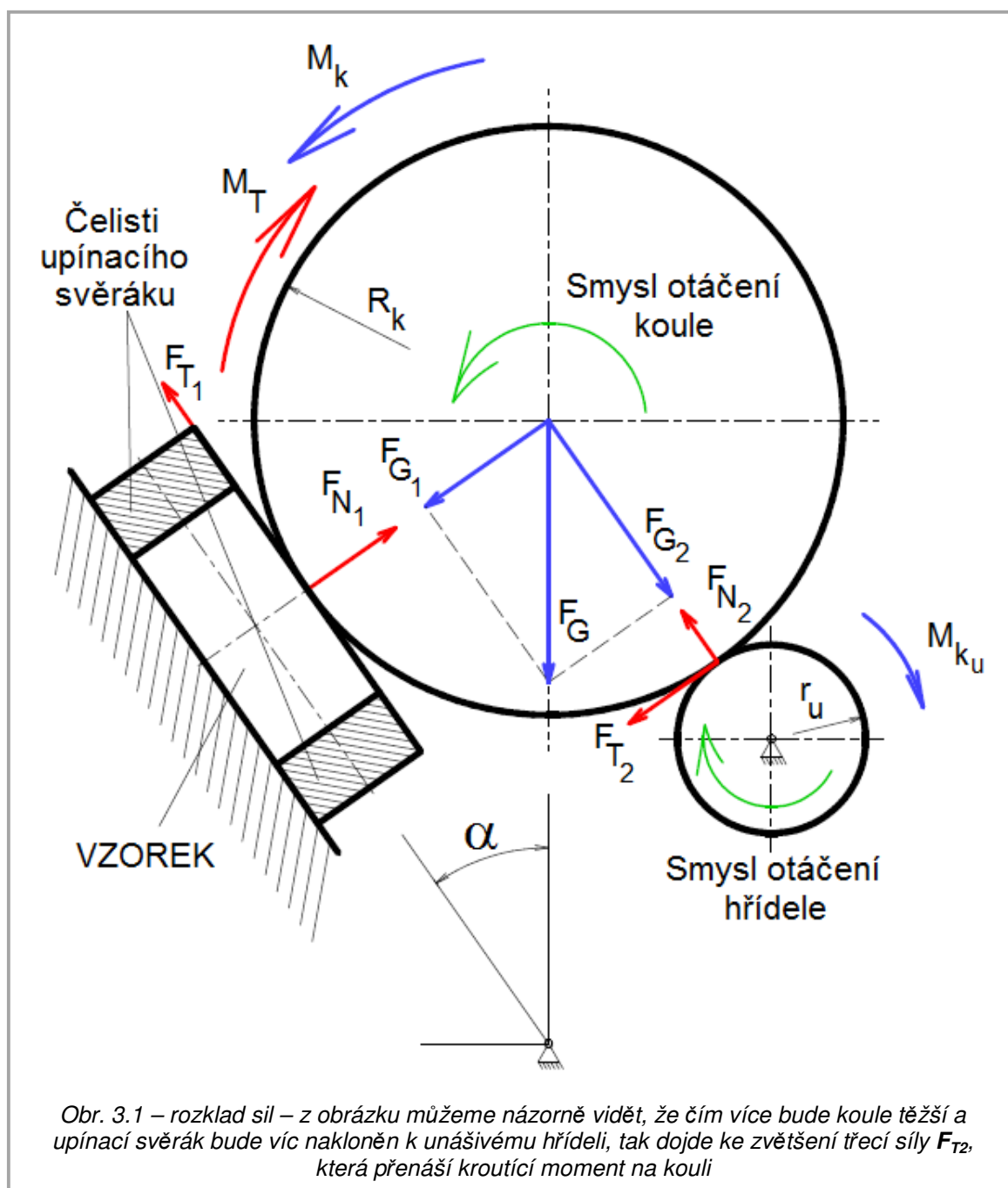
Cílem je určit metodiku vhodnou pro experiment s přístrojem kalotest. Správná metodika experimentu by měla zaručit, jak se má přístroj nastavit pro experiment, jaké prostředky se mají použít a co všechno by se mělo optimalizovat pro měření vzorků. Optimalizace by měla být taková, aby na vzorcích, na kterých má být proveden experiment, bylo možné zřetelně rozpoznat výsledky a to pokud možno s co nejmenší chybou.

Návrh řešení (optimalizace):

Pro měření tribologických vlastností na přístroji kalotest je nutno provést několik drobných úprav, díky kterým nebude docházet k předčasnému (špatnému) konci měření – koule se zastaví a nebude se točit, nebo její rychlost nebude konstantní. **Pozn. – Veškeré naměřené výsledky jsou měřeny od nuly daného časového intervalu na novém místě na stejném vzorku, aby došlo k co největšímu snížení chyby měření. Každý výsledek je prozkoumán individuálně bez závislosti na předchozím výsledku.**

Náklon svěráku k upínání vzorků:

Aby došlo k dobré adhezi koule v unášivém hřídeli a tím k přenesení kroutícího momentu na kouli, je nutné, aby se většina váhy koule rozkládala do unášivého hřídele. Z tohoto důvodu volím úhel náklonu svěráku od svislé osy 35°, je to nejnižší možný úhel svěráku, který mi dovoluje konstrukce. Podmínkou tedy, aby se koule točila, je nutné způsobit v unášivém hřídeli co největší možnou třecí sílu F_{T2} . Výpočet rozkladu sil je uveden v příloze.



Optimální otáčky unášivého hřídele:

V rámci několika pokusů bylo zvoleno, že optimální otáčky unášivé hřídele budou 1000 [1·min⁻¹]. Pokud jsou otáčky nižší, koule se točí pomalu a pokud jsou otáčky vyšší, koule prokluzuje v unášivém hřídeli a netočí se.



Kvalita povrchu koule:

Opět po několikanásobném zkoušení jasně vyplývá, že koule, které nejsou před pokusem naleštěny (hadrem) a které nejsou nové (starší použité koule u kalotestu), se v unášечи netočí. Možný důvod může být stejný jako v našem experimentu – záleží na tvrdosti a na houževnatosti koule a také na její adhezi s unášivým hřídelem. Tudíž jestli se koule v unášечи točí, nezáleží pouze na její velikosti nebo hmotnosti.

Kvalita povrchu unášivého hřídele:

Unášivý hřídel byl z předchozího testování na přístroji poškozen. Jednalo se o poškození povrchu. Byl tedy přebroušen na drsnost $R_a = 0,8$.

Optimalizace velikosti koule a měřeného času:

Optimalizaci velikosti koule provedeme měřením kalot různých materiálů. Zkusíme koule několika velikostí, abychom zjistili, která vyhovuje nejvíce. Časové intervaly jsou zvoleny náhodně. Keramické vzorky nebyly broušeny stejnou metodou a slouží pouze jako testovací vzorky pro detekci metodiky.



Použité prostředky:

Tabulka 3.1 - nové ložiskové koule různých velikostí

koule		č.1	č.2	č.3	č.4
ØD	[mm]	27,00	31,75	34,92	44,45
m	[g]	80,154	130,428	173,256	357,785
V	[mm ³]	10306	16758	22296	45985
F _G	[N]	0,786	1,279	1,700	3,509

Koule jsou vyrobeny z materiálu 14 209 Cr – Mn (0,90 až 1,10), oceli na valivá ložiska, dosahuje meze pevnosti $R_m = 608 - 765$ MPa (záleží na tepelném zpracování), minimální mez kluzu $R_{emin} = 441$ MPa, třída odpadu 021, tvrdost 908 HV 1.

Otáčkoměr

Digitální otáčkoměr – Lutron DT 22 36.

Otáčky byly měřeny kontaktně při každém zahájení měření a v polovině časových intervalů.

Brusné médium

Diamantová pasta velmi rychle prohlubuje výbrus, experiment lze tedy provádět v relativně kratším časovém intervalu. Byla použita na vyzkoušení u jednoho testovaného vzorku. Výbrus byl sice velký a velmi dobře čitelný pod mikroskopem, ale rychlost koule nebyla konstantní. Také je zapotřebí pastu dodávat konstantním přísunem, což je v našich testovacích podmínkách neuskutečnitelné.

Mikroskop OPT 106 z SGAC

Laboratorní mikroskop se zvětšením v rozsahu $0,6 \div 7$. Typ zvětšení byl zvolen **4 - násobný**, kde jeden dílek odpovídá skutečné velikosti 0,025 mm. Pro odečtení velikosti výbrusu je toto zvětšení optimální.

Stopky – Festina

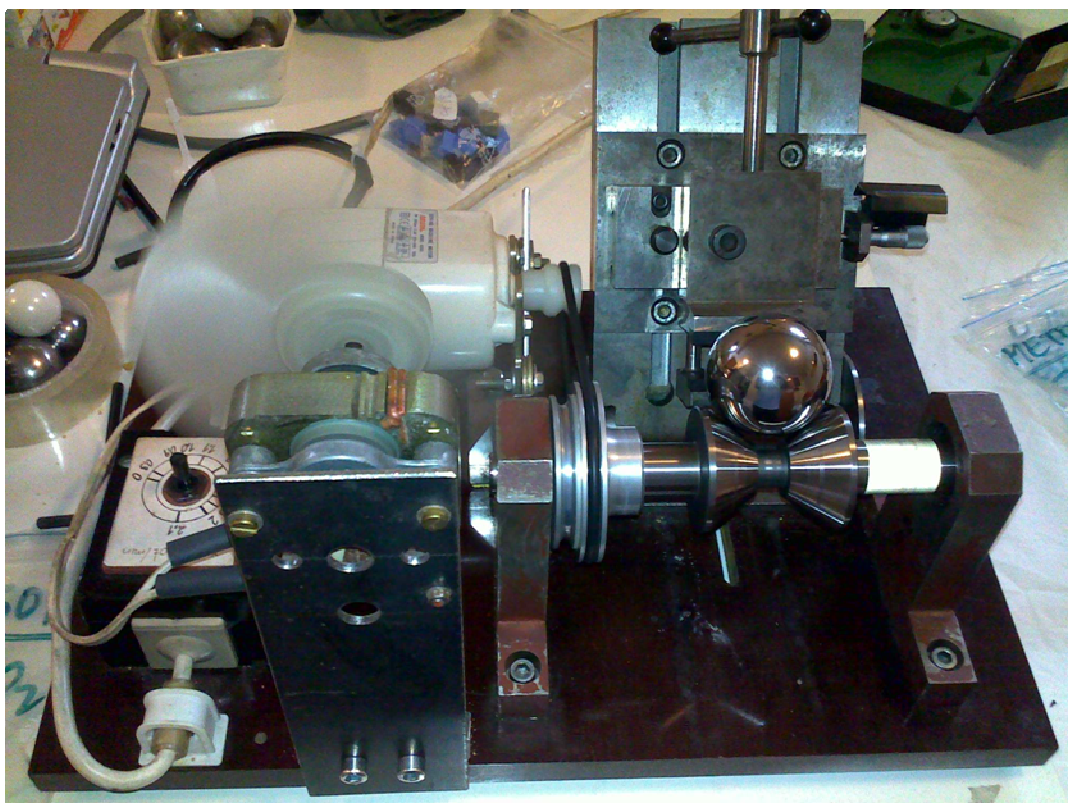
Analogové stopky od firmy Festina, registrovaný model 16071.

Keramické vzorky

Technická keramika různých složení **viz kap. 2.2.**

Nový motor, externí chladič

Zakoupení nového motoru, typ motoru H 36 s výkonem $P = 70 \text{ W}$, otáčky na výstupu $n = 5000 \text{ [1} \cdot \text{min}^{-1}]$. Úprava kalotestu doplněním o externí chladič elektromotor se samostatným pohonem.



Obr. 3.2 – Kalotest za chodu po upravení



Výsledky:

V této kapitole nyní popíšeme výsledky, které pouze určují metodiku. Na jejich základě provedeme vyhodnocení a určíme takovou metodiku experimentu, která bude zaručovat, že měření proběhne za stejných podmínek bez rychlostních výkyvů koule.

Volba velikosti koule:

Pomocí použitých prostředků zkusíme najít vhodnou velikost koule pro experiment. Z předchozích úvah by se mělo jednat o kouli s vyšší hmotností.

Tabulka 3.2 – testování koule 1

koule 1	Typ/čas	15 s	30 s	45 s	1 min	2 min	3 min	4 min	10 min
Ød [mm]	D 320	x	x	x	-	x	x	x	x
Ød [mm]	D 220	x	x	-	-	x	x	x	x
Ød [mm]	D 210	x	-	x	X	x	x	x	x
Ød [mm]	SN 300	-	-	x	-	x	x	x	x
Ød [mm]	D 240	x	x	-	X	x	x	x	x

Tabulka 3.3 – testování koule 2

koule 2	Typ/čas	15 s	30 s	45 s	1 min	2 min	3 min	4 min	10 min
Ød [mm]	D 320	-	-	-	-	0,25	x	x	x
Ød [mm]	D 220	x	x	x	X	x	x	x	x
Ød [mm]	D 210	x	x	x	X	x	x	x	x
Ød [mm]	SN 300	-	-	-	-	0,2	-	-	0,25
Ød [mm]	D 240	x	x	x	X	x	x	x	x

Tabulka 3.4 – testování koule 3



koule 3	Typ/čas	15 s	30 s	45 s	1 min	2 min	3 min	4 min	10 min
Ød [mm]	D 320	-	-	-	0,3	0,4	0,4	0,5	x
Ød [mm]	D 220	-	-	-	-	-	0,25	0,35	x
Ød [mm]	D 210	-	-	-	-	0,25	0,3	0,3	0,35
Ød [mm]	SN 300	-	-	-	-	0,25	0,3	0,3	0,4
Ød [mm]	D 240	-	-	-	0,25	0,3	0,3	-	-

Tabulka 3.5 – testování koule 4

koule 4	Typ/čas	15 s	30 s	45 s	1 min	2 min	3 min	4 min	10 min
Ød [mm]	D 320	-	-	-	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
Ød [mm]	D 220	-	-	-	-	-	0,2	0,35	0,35
Ød [mm]	D 210	-	-	-	-	-	0,2	0,25	0,35
Ød [mm]	SN 300	-	-	-	-	-	0,25	0,3	0,4
Ød [mm]	D 240	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,4

Diskuze výsledků:



U koule č.1 a č.2 můžeme vidět, že díky špatné adhezi mezi unášivým hřídelem a koulemi nedošlo k dobrému přenosu kroutícího momentu, proto koule pouze stály nebo vytvořily výsledek, který se nedal odečíst. U koule č.3 vidíme značné zlepšení díky lepší adhezi v unášivém hřídeli, avšak pro experiment koule stále není vhodná, protože projevuje velké rychlostní odchylky. Koule č.4 díky nejvyšší hmotnosti měla velmi dobrou adhezi na unášivém hřídeli, neměla odchylky v rychlosti, takže byla zvolena jako optimální pro experiment.

Legenda:

- výsledek, který se nedal pod mikroskopem odečíst



koule se několikrát zastavila v některé z částí měření, nebo se vůbec
x neroztočila

 koule při testu lehce zpomalovala
 koule při testu hodně zpomalovala

Závěr:

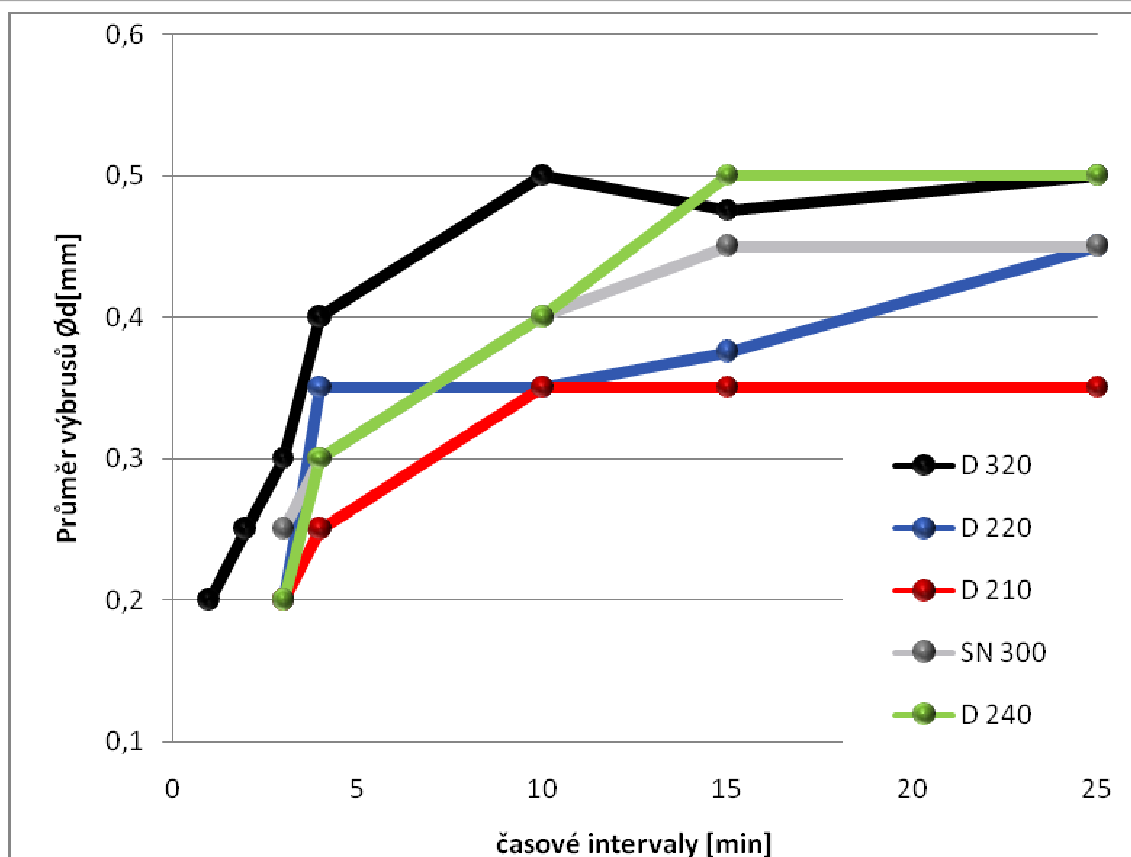
Velikost koule lze optimalizovat pouze podle velikosti její hmotnosti. Vůbec nezáleží na jejím průměru. Testy byly provedeny za stejných podmínek. To nám vylučuje možnost zásadních chyb, které by výsledek nějakým způsobem mohly ovlivnit. Vzhledem k výsledkům, které jsou uvedeny v grafech a tabulkách, bylo rozhodnuto, že se pro další experiment použije nejtěžší koule č.4. Koule č.4 jako jediná nevykazovala znatelné rychlostní výchylky.

Časová optimalizace:

Nyní je cílem najít vhodný časový interval, nejlépe ten, kde se přestane výbrus rychle zvětšovat. Ten poté bude zvolen i pro experiment. Pokračuje se tedy v testování s koulí č.4, protože byla zvolena jako optimální. Časové intervaly jsou opět zvoleny náhodně.

Tabulka 3.6 – hledání optimálního času s koulí 4

koule 4	Typ/čas	15 s	30 s	45 s	1 min	2 min	3 min	4 min	10 min	15 min	25 min
Ød [mm]	D 320	-	-	-	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,475	0,5
Ød [mm]	D 220	-	-	-	-	-	0,2	0,35	0,35	0,375	0,45
Ød [mm]	D 210	-	-	-	-	-	0,2	0,25	0,35	0,35	0,35
Ød [mm]	SN 300	-	-	-	-	-	0,25	0,3	0,4	0,45	0,45
Ød [mm]	D 240	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5



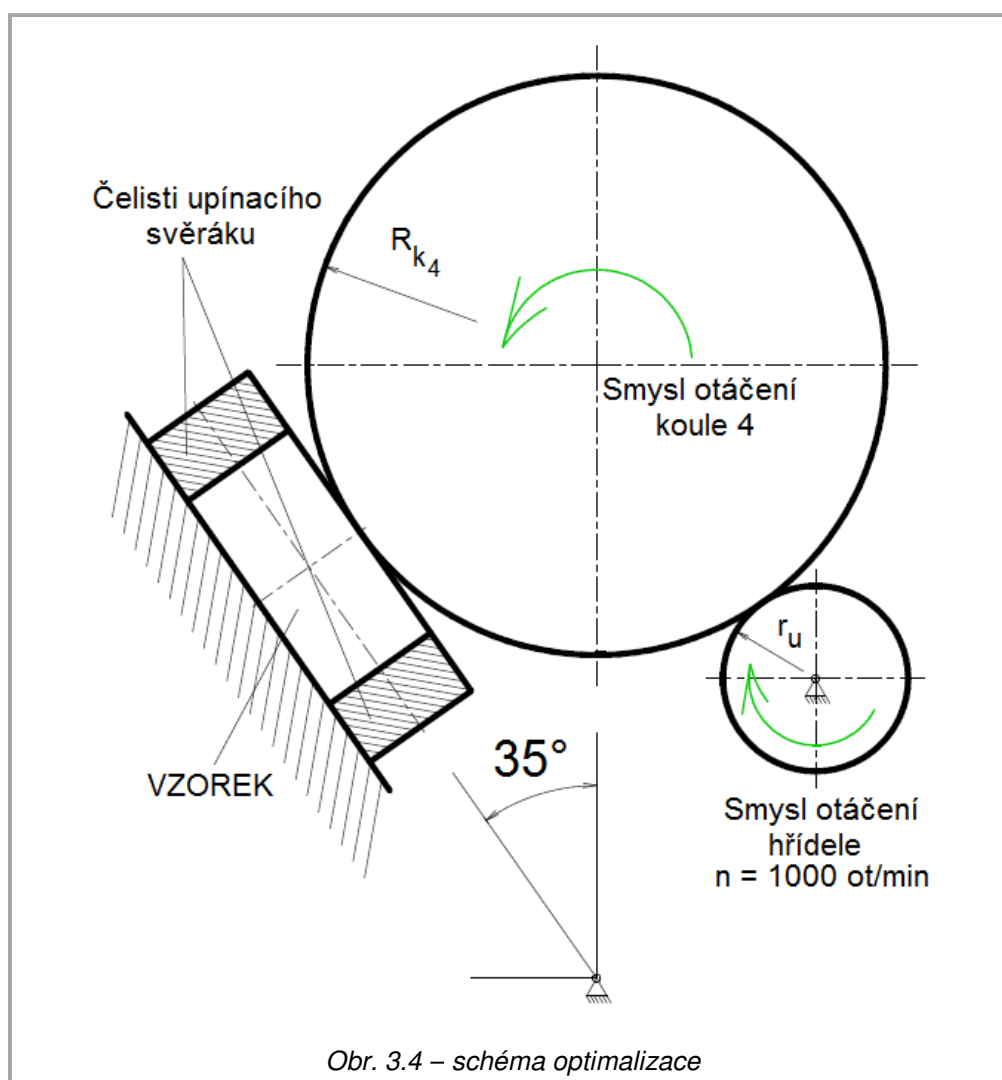
Obr. 3.3 – graf zobrazující zvětšení průměru výbrusu v závislosti na čase

Diskuze výsledků:

V 15 minutovém intervalu docházelo u koule k výkyvům v rychlosti, což může být důvod, proč u prvního vzorku D 320 můžeme pozorovat mírný propad výsledné křivky. Nižší opotřebení vzorku může mít také za následek **tvorba transferové vrstvy viz kap. 2.1.3.1.**

Závěr:

Z uvedených výsledků můžeme hodnotit, že optimální čas pro experiment bude 25 minut, protože už není zaznamenán takový nárůst velikosti výbrusů. Avšak pro ověření experimentu volím ještě interval v délce 1 hodiny. Tím experiment prověřím, zda hodnoty odpovídají skutečnosti.



Obr. 3.4 – schéma optimalizace

3.1.2 EXPERIMENT POMOCÍ PŘÍSTROJE KALOTEST

Metodika experimentu byla stanovena **viz kap. 3.1.1**. Pomocí této metodiky a použitých pomůcek se stanovíme tribologické vlastnosti vybraných keramických materiálů. Optimální čas pro měření byl zvolen 25 min, kontrolní čas pro ověření výsledků byl stanoven na 1 hodinu.

Specifikace cílů:

S pomocí zjištěné metodiky pro experiment **viz kap. 3.1.1** se pokusíme stanovit tribologické vlastnosti (míru opotřebení) u vybraných keramických materiálů. Výsledky vyhodnotíme a v další kapitole popíšeme závislosti mezi detekovanými tribologickými vlastnostmi, tvrdostí, tryskáním a drsností povrchu.



Návrh řešení:

Na přístroji kalotest se pokusíme vyhledat nejlepší kontaktní dvojici ocel – keramika z hlediska míry opotřebení keramického vzorku.

Použité prostředky:

Keramické vzorky a jejich příprava pro experiment

Vybrané keramické materiály viz obr. 2.11 a obr. 2.12. byly z jedné strany přebroušeny a následně vyleštěny na drsnost $R_a = 0,03$. Druhá strana vzorku měla hodnotu drsnosti $R_a = 0,4$.

Nová ocelová koule

Při detekci metodiky došlo k povrchovému poškození koule č.4. Pro správnost dosažených výsledků byla tedy použita koule nová, odpovídající parametrům koule č.4.

Mikrometr, Drsnoměr

Mikrometr s rozsahem 25 – 50 mm, drsnoměr Mitutoyo SJ – 301.

Stejně prostředky jako v kapitole 3.1.1.

Výsledky:

Měříme velikost opotřebení keramických vzorků v čase.

$\varnothing d$ – odečtený průměr výbrusu [mm]

h – vypočítaná hloubka výbrusu [mm] – výpočet v příloze

V – vypočítaný odbroušený objem [mm³] – výpočet v příloze

Tabulka 3.7 – měření neopracované strany v čase $t = 25$ min

N-25 min	$\varnothing d$	h	V
Vzorky	[mm]	[mm]	[mm ³]



D220	0,30	0,00051	0,00002
T199R	0,48	0,00130	0,00012
T195R	0,50	0,00141	0,00014
Reynolds	0,55	0,00170	0,00020
TOSOH	0,75	0,00316	0,00070
D420	0,85	0,00406	0,00115
D320	0,38	0,00081	0,00005

Nejnižší opotřebení se projevilo u vzorku D220 a nejvyšší opotřebení u vzorku D420.

Tabulka 3.8 – měření neopracované strany v čase $t = 60$ min

N-60 min	Ød	h	V
Vzorky	mm	[mm]	[mm ³]
D220	0,75	0,00316	0,00070
T199R	1,05	0,00620	0,00269
T195R	1,03	0,00597	0,00249
Reynolds	1,00	0,00563	0,00221
TOSOH	1,00	0,00563	0,00221
D420	1,25	0,00879	0,00539
D320	0,73	0,00300	0,00063

Výsledky začínají prokazovat lineární pravidelnost v nárůstu opotřebení. Nejnižší opotřebení je však nyní zaznamenáno u vzorku D320, nejvyšší opět u vzorku D420.

Tabulka 3.9 – měření leštěné strany v čase $t = 25$ min

L-25 min	Ød	h	V
Vzorky	mm	[mm]	[mm ³]
D220	0,25	0,00035	0,00001
T199R	0,43	0,00104	0,00008
T195R	0,30	0,00051	0,00002
Reynolds	0,45	0,00114	0,00009
TOSOH	0,50	0,00141	0,00014
D420	0,75	0,00316	0,00070
D320	0,68	0,00260	0,00047



Nejnižší opotřebení nyní projevila materiál D220, zatímco nejvyšší opět D420, jako u měření neopracované strany.

Tabulka 3.10 – měření leštěné strany v čase $t = 60$ min

L-60 min	$\varnothing d$	h	V
Vzorky	mm	[mm]	[mm ³]
D220	0,50	0,00141	0,00014
T199R	0,50	0,00141	0,00014
T195R	0,60	0,00202	0,00029
Reynolds	0,70	0,00276	0,00053
TOSOH	1,75	0,01723	0,02073
D420	0,98	0,00540	0,00204
D320	0,95	0,00508	0,00180

Nejnižší opotřebení opět projevila materiál D220, ale stejný výsledek je i u materiálu T199R. Nejvyšší opotřebení se projevilo u materiálu TOSOH.

Závěr:

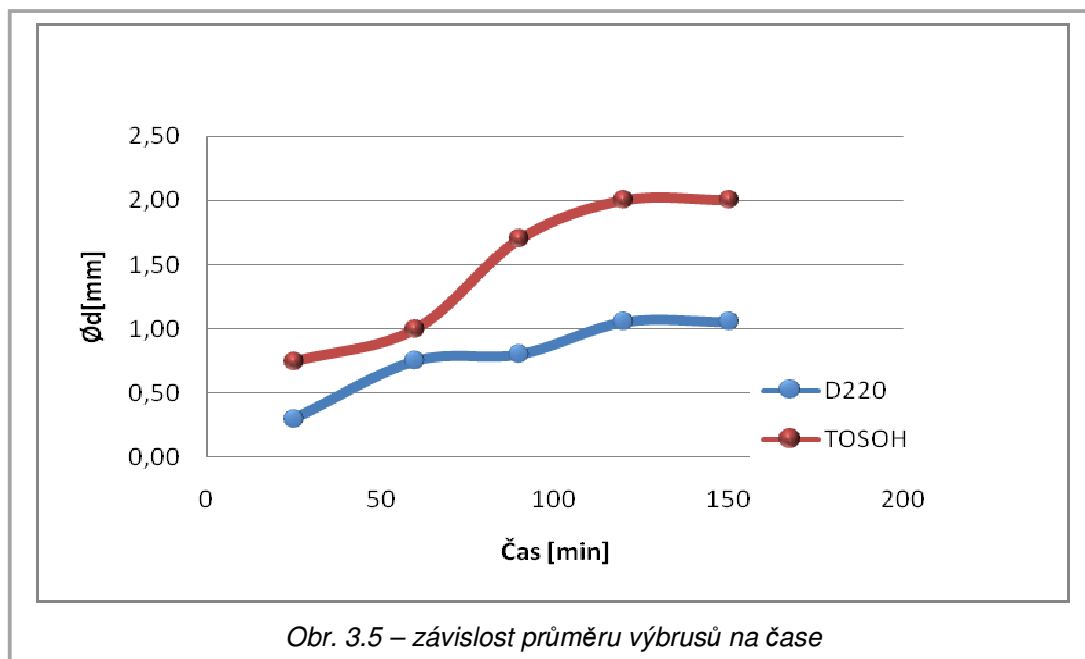
Vzhledem k předchozím výsledkům lze říci, že nejvíce opotřebení odolává materiál D220, zatímco nejméně D420 a TOSOH. Pro vytvoření konkrétní znalosti o průběhu opotřebení byly zvoleny materiály D220 a TOSOH pro další testování.

Velikost opotřebení keramických mat. v časových intervalech

Pro experiment byly zvoleny dva materiály – D220 a TOSOH vzhledem k předchozím výsledkům. Nyní bude provedeno testování v delších časových intervalech, abychom mohli zaznamenat růstu opotřebení.

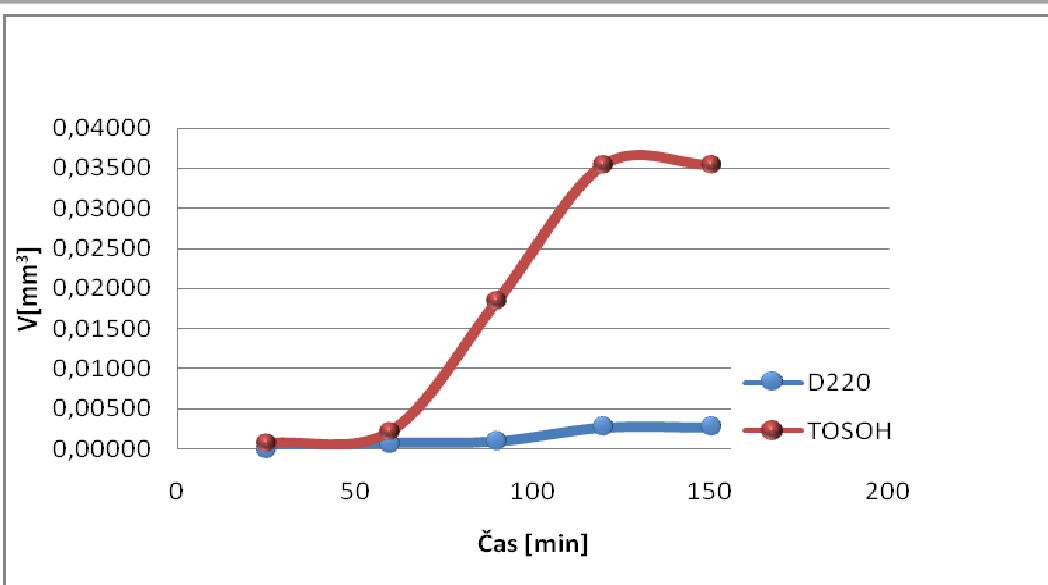
Tabulka 3.11 – neopracovaná strana ($\varnothing d$ – odečtený průměr výbrusu [mm])

Typ/čas	25 min	60 min	90 min	120 min	150 min
D220	0,30	0,75	0,80	1,05	1,05
TOSOH	0,75	1,00	1,70	2,00	2,00

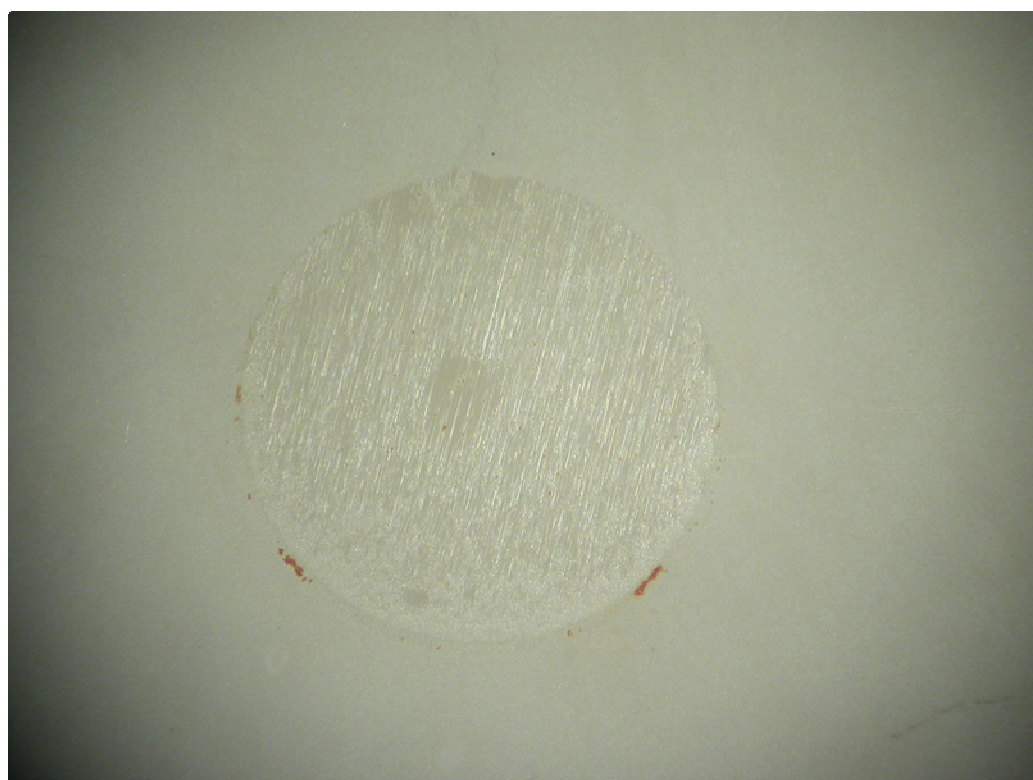


Tabulka 3.12 – neopracovaná strana (V – vypočítaný odbroušený objem [mm³])

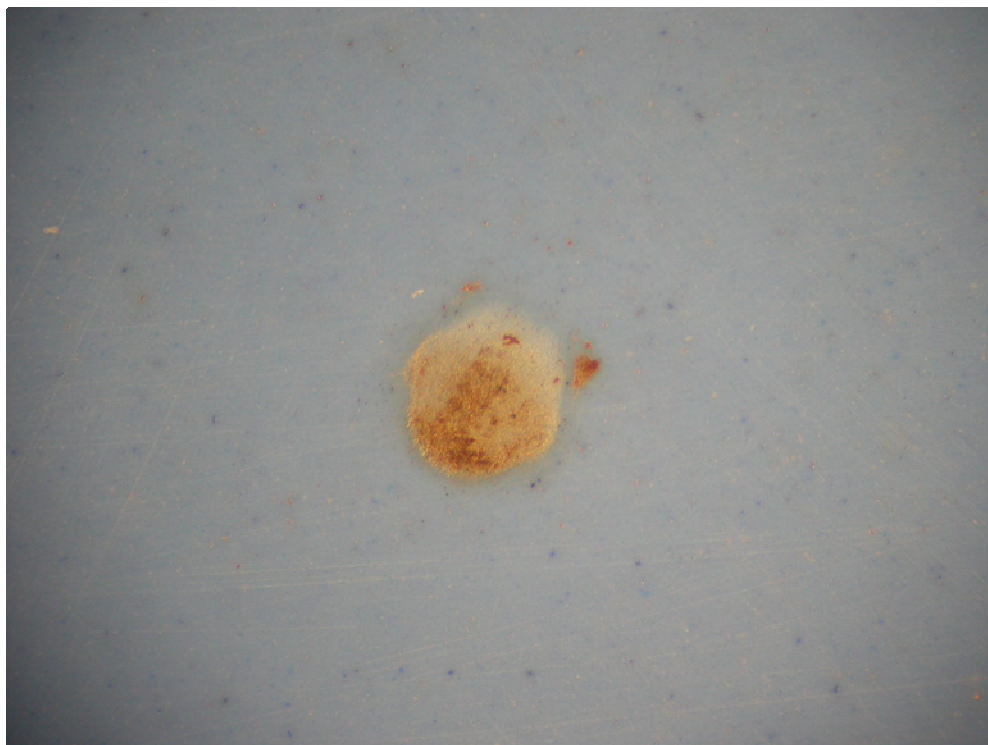
Typ/čas	25 min	60 min	90 min	120 min	150 min
D220	0,00002	0,00070	0,00090	0,00269	0,00269
TOSOH	0,00070	0,00221	0,01846	0,03536	0,03536



Obr. 3.6 – závislost odbroušeného objemu materiálu na čase



Obr. 3.7 – TOSO – výbrus zvětšený pod mikroskopem



Obr. 3.8 – D220 – výbrus zvětšený pod mikroskopem

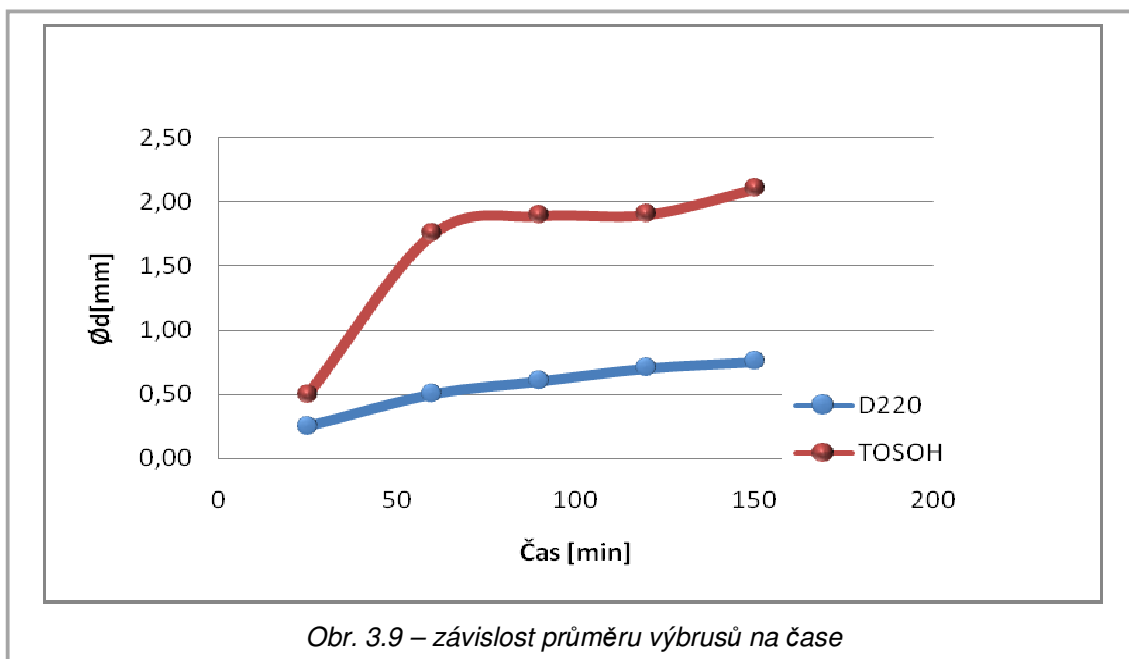
Diskuze výsledků:

Z grafů lze vyčíst, že nejvyšší opotřebení je na začátku experimentu v časových intervalech do 2 hodin. Přibližně po 2 hodinách testování se velikost výbrusu již nezvětšuje. To je zřejmě následek poklesu měrného napětí v tlaku na testovaný materiál, způsobený růstem velikosti styčné plochy.

Na **obr. 3.7** je zřetelně vidět “čistý” výbrus. Na **obr. 3.8** můžeme vidět zbytky transferového filmu, který zřejmě vzniká u odolnějších materiálů proti opotřebení.

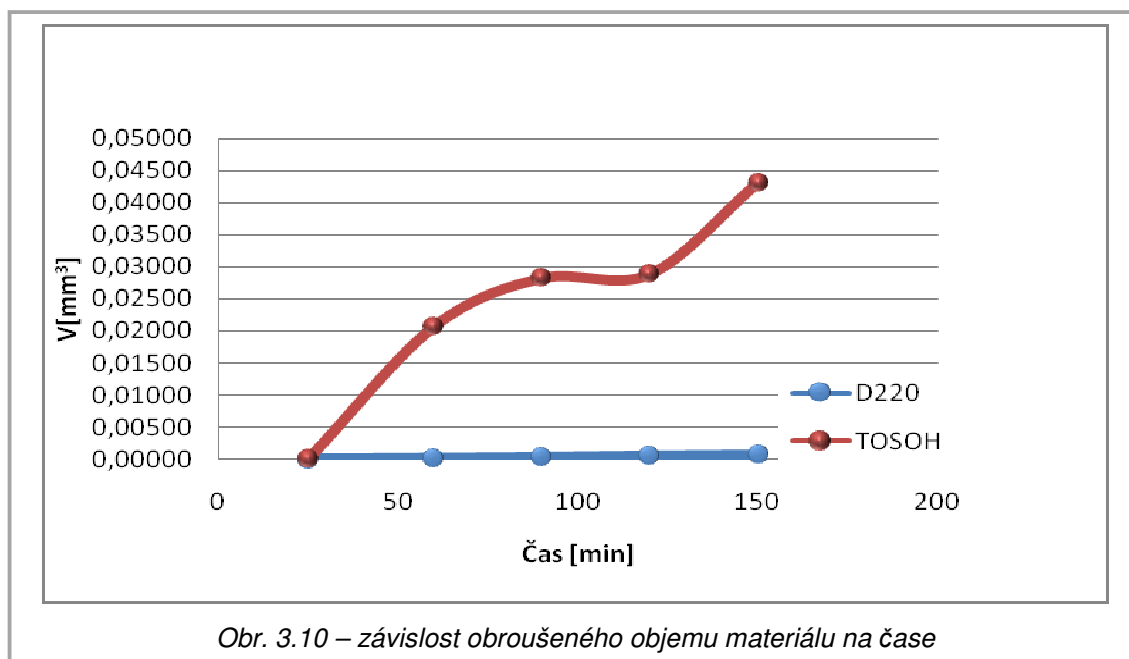
Tabulka 3.13 - leštěná strana (Ød – odečtený průměr výbrusu [mm])

Typ/čas	25 min	60 min	90 min	120 min	150 min
D220	0,25	0,50	0,60	0,70	0,75
TOSOH	0,50	1,75	1,89	1,90	2,10



Tabulka 3.14 – leštěná strana (V – vypočítaný odbroušený objem [mm³])

Typ/čas	25 min	60 min	90 min	120 min	150 min
D220	0,00001	0,00014	0,00029	0,00053	0,00070
TOSOH	0,00014	0,02073	0,02820	0,02880	0,04299





Diskuze výsledků:

Průměr výbrusu u D220 roste téměř lineárně a pomaleji, než u strany neopracované. Materiál TOSOH vykazuje velmi rychlý růst opotřebení do 1 hodiny, poté se opotřebení začne snižovat a výbrus se už tolik nezvětšuje. TOSOH se také opotřebovává více při zkoušení leštěné strany.

Závěr:

Nejlepší tribologické vlastnosti vykazuje **kontaktní dvojice materiálů ocel ČSN 14 209 – keramika D220 (90 % Al_2O_3 + 10 % ZrO_2) s leštěným povrchem.**



4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Specifikace cílů:

Cílem je stanovit závislosti mezi naměřenými tribologickými vlastnostmi, tvrdostí, tryskáním a drsností povrchu. Poté bude cílem zkusit najít ve stanovených závislostech obecný parametr, který určuje, proč se materiály opotřebovávají způsobem, jakým se opotřebovávají. Vzhledem k tomu, že bylo k experimentu použito mnoho různorodých keramických materiálů a pouze jeden materiál ocelové koule, nemusí být tento parametr všude stejný, avšak je nutné, aby přibližně odpovídal závislostem, které vzniknou z naměřených hodnot.

Návrh řešení:

Podle teorie je velmi důležitým faktorem u tribologických vlastností materiálů tvrdost. Proto mají keramické materiály obecně velmi dobré tribologické vlastnosti. Stanovením závislostí mezi tribologickými vlastnostmi a tvrdostí si můžeme toto kritérium ověřit a popřípadě potvrdit, zda skutečně tvrdost materiálu ovlivňuje adhezivní opotřebení materiálu.

Použité prostředky:

Tryskačka

Tryskání povrchu pomocí safírového prášku Al_2O_3 F120. Tryská se 10 sekund za tlaku 0,4 MPa na leštěný povrch vzorku. Na jednu náplň se spotřebuje 40 gramů prášku. Jedná se o abrazivní opotřebení povrchu vzorku.

Měření specifické hmotnosti

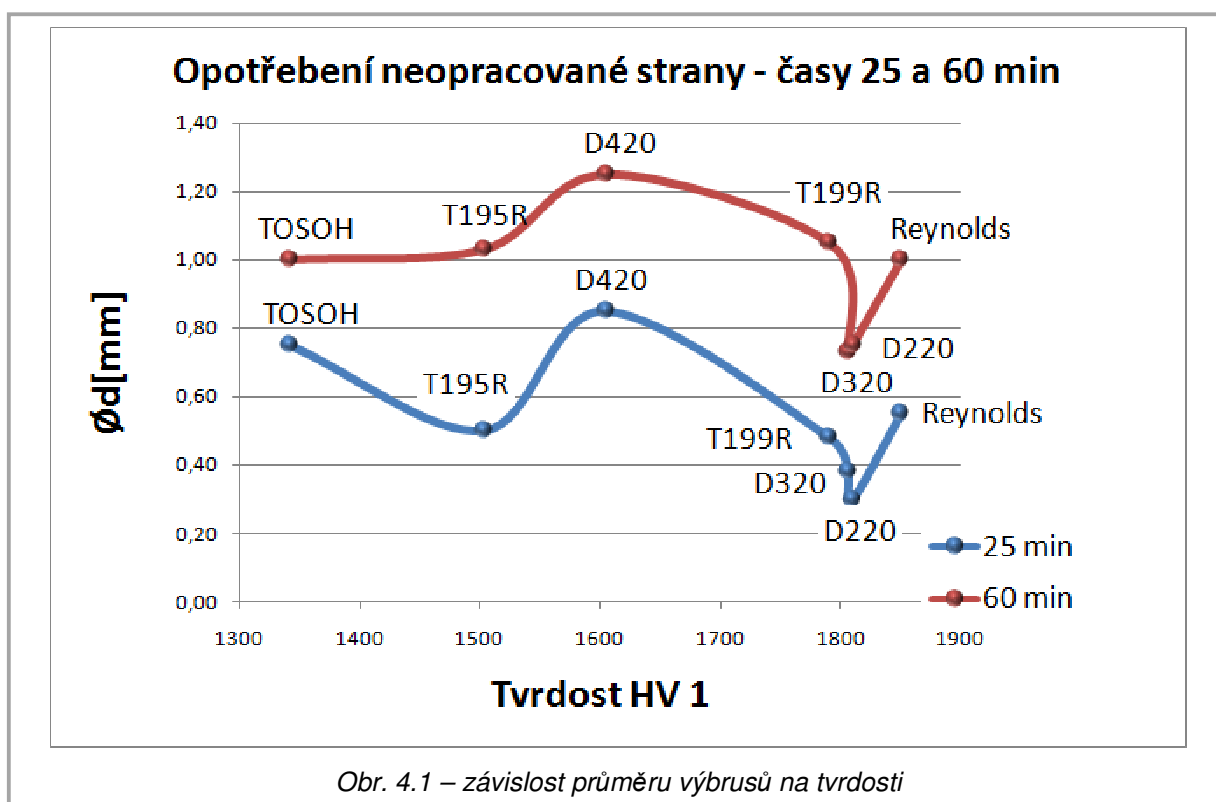
Měření tvrdosti metodou Vickers

Objektiv zvětšení 40 krát, zatížení HV 1 a doba zatížení 20 sekund.

Výsledky:

Tabulka 4.1 – opotřebení neopracované strany vzorků v intervalech 25 a 60 min

Vzorky	Výbrus - 25 min	Výbrus - 60 min	Tvrdost
Název	Ød[mm]	Ød[mm]	HV 1
D220	0,30	0,75	1 810
T199R	0,48	1,05	1 790
T195R	0,50	1,03	1 503
Reynolds	0,55	1,00	1 850
TOSOH	0,75	1,00	1 342
D420	0,85	1,25	1 605
D320	0,38	0,73	1 806

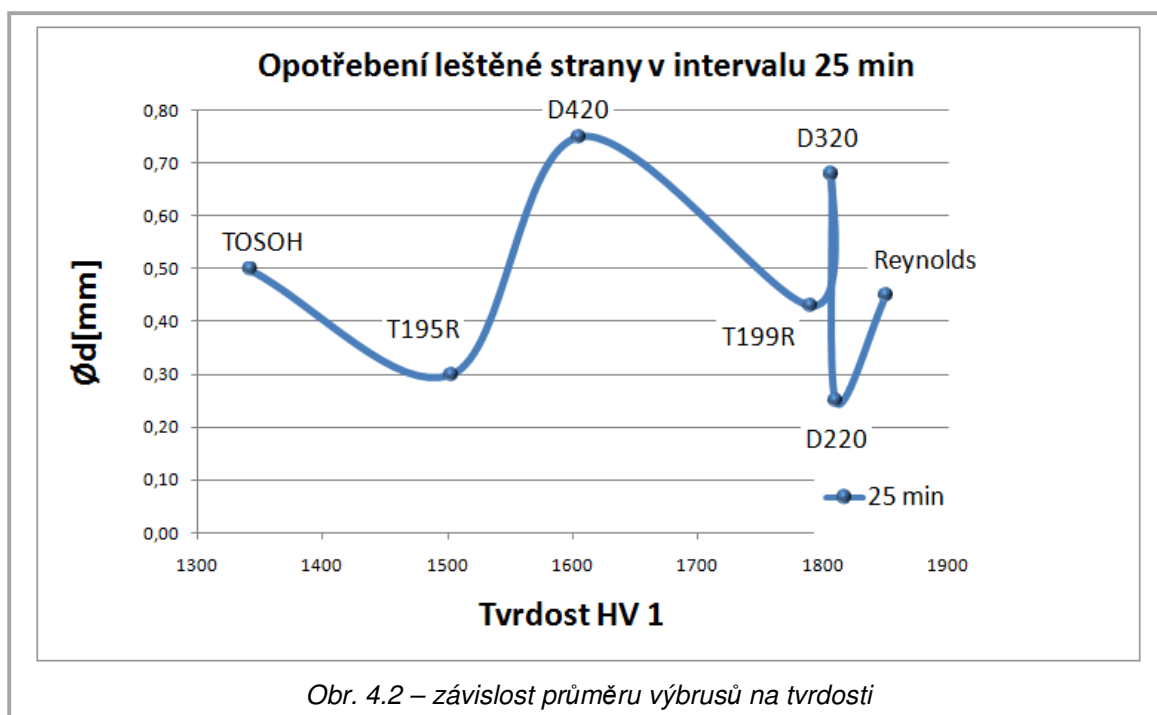


Diskuze výsledků:

U **obr. 4.1** v intervalu měření 25 minut můžeme pozorovat klesající tendenci hodnot opotřebení v závislosti na zvyšující se hodnotě tvrdosti, což znamená, že tvrdost skutečně tribologické vlastnosti ovlivňuje. Ovšem to nemusí být jediný faktor. V intervalu měření 60 minut pozorujeme velmi podobné výsledky jako v předchozím intervalu, ale klesající tendence není tolik patrná z důvodu rozdílnosti keramických materiálů – každý má jiné tribologické vlastnosti, takže opotřebení se zvyšuje jinak. Z toho vyplývá, že tvrdost není jediným faktorem, který tribologické vlastnosti ovlivňuje.

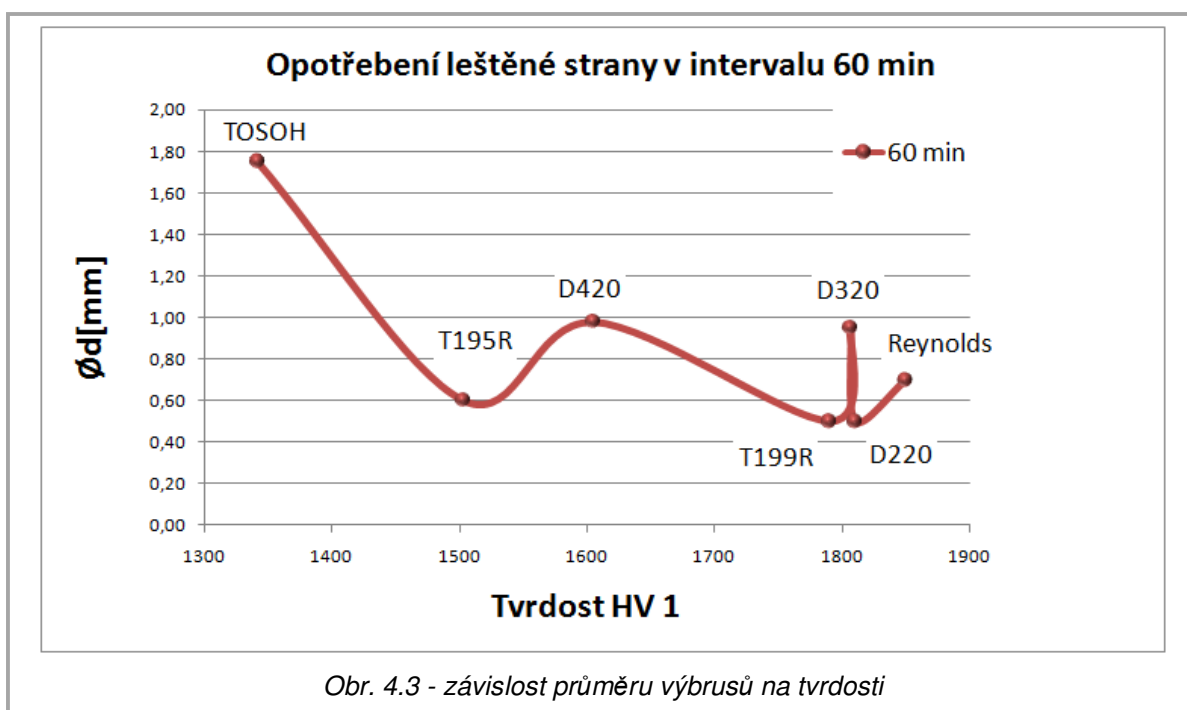
Tabulka 4.2 – opotřebení leštěné strany vzorků v intervale 25 min

Vzorky	Výbrus – 25 min	Tvrdost
Název	Ød[mm]	HV 1
D220	0,25	1 810
T199R	0,43	1 790
T195R	0,30	1 503
Reynolds	0,45	1 850
TOSOH	0,50	1 342
D420	0,75	1 605
D320	0,68	1 806



Tabulka 4.3 – opotřebení leštěné strany vzorků v intervale 60 min

Vzorky	Výbrus – 60 min	Tvrdost
Název	Ød[mm]	HV 1
D220	0,50	1 810
T199R	0,50	1 790
T195R	0,60	1 503
Reynolds	0,70	1 850
TOSOH	1,75	1 342
D420	0,98	1 605
D320	0,95	1 806

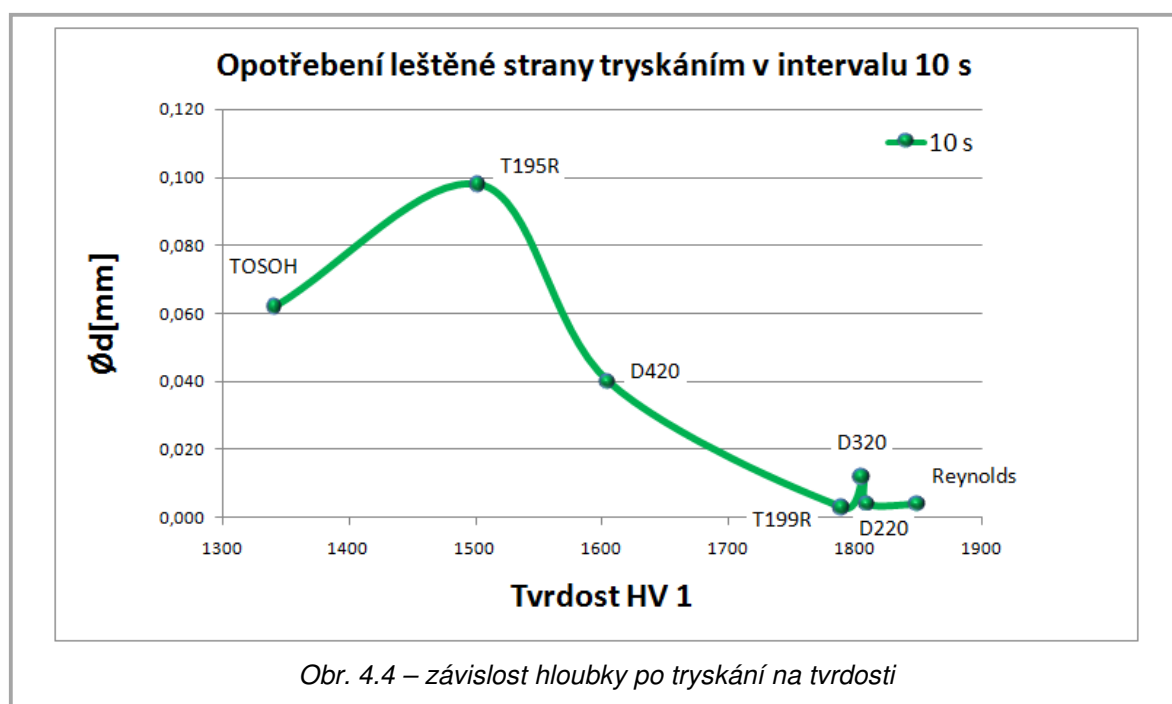


Diskuze výsledků a porovnání:

Na **obr. 4.2** můžeme vidět, že leštěná plocha vzorku, oproti ploše neopracované, zlepšuje výrazně tribologické vlastnosti, ale u některých vzorků urychluje opotřebení. Pokud se ale podíváme na **obr. 4.3**, můžeme odečíst, že leštěný povrch výrazně snižuje opotřebení u keramických materiálů, jediný materiál je výjimkou a to je relativně měkký TOSOH. To znamená, že faktory, které budou ve větší míře ovlivňovat tribologické vlastnosti, jsou tvrdost a drsnost povrchu resp. jeho úprava.

Tabulka 4.4 – abrazivní opotřebení leštěné strany tryskáním v intervalu 10 s

Vzorky	Tvrdost	Tryskání
Název	HV 1	h (mm)
TOSOH	1342	0,062
T195R	1503	0,098
D420	1605	0,040
T199R	1790	0,003
D320	1806	0,012
D220	1810	0,004
Reynolds	1850	0,004



Diskuze výsledků:

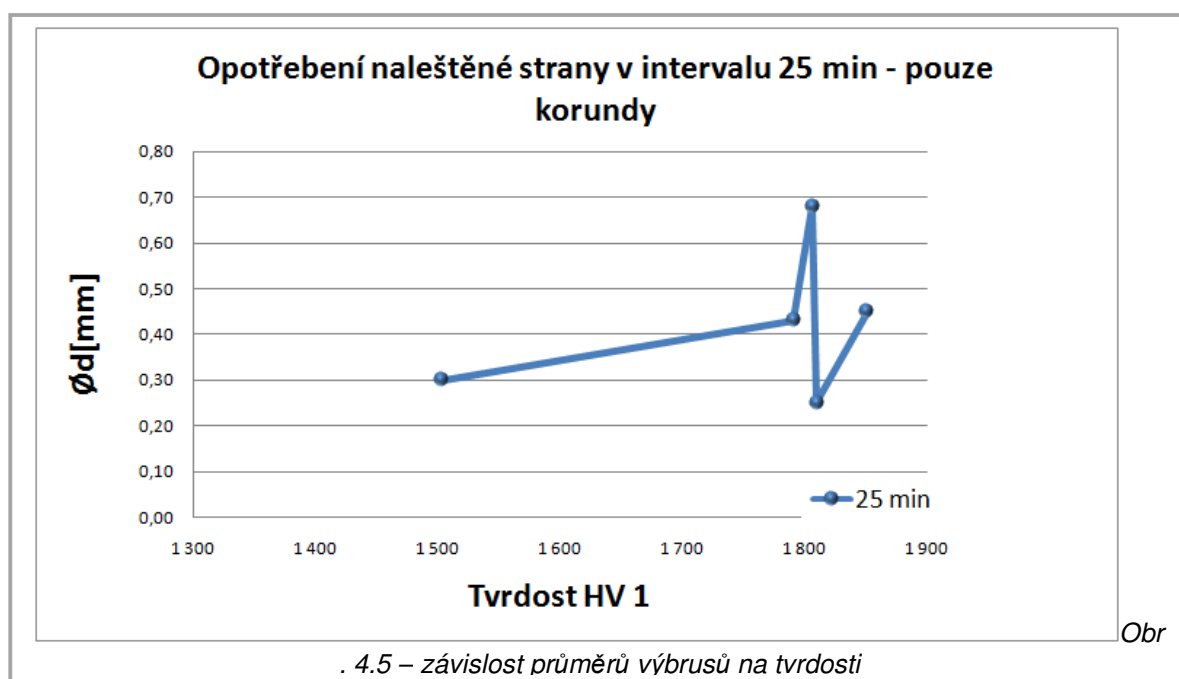
Nyní můžeme z **obr. 4.4** s přehledem vidět, že tribologické vlastnosti skutečně ovlivňuje tvrdost i drsnost povrchu, protože pro měření byly použity vzorky s vyleštěnou plochou. Vidíme opět jasně snižující se opotřebení se vzrůstající tvrdostí.



Porovnání výsledků korundů (Al_2O_3):

Tabulka 4.5 – porovnání výsledků pouze korundů pro interval 25 min

Vzorky	Výbrus - 25 min	Tvrdost
Název	$\varnothing d[\text{mm}]$	HV 1
D220	0,25	1 810
T199R	0,43	1 790
T195R	0,30	1 503
Reynolds	0,45	1 850
D320	0,68	1 806

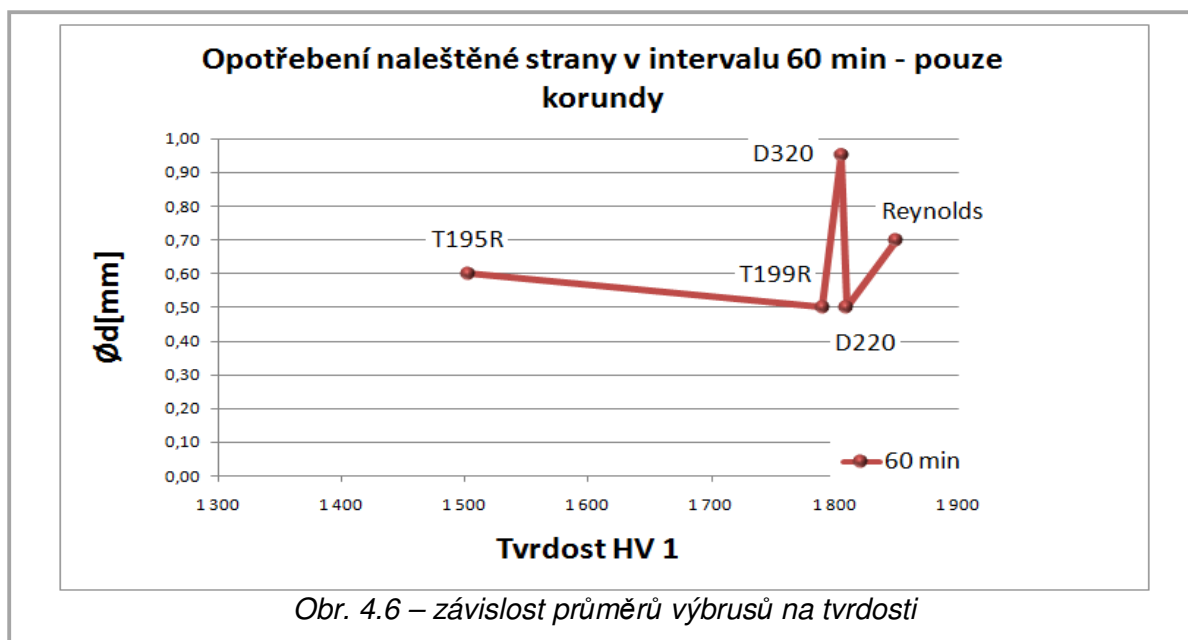


Tabulka 4.6 - porovnání výsledků pouze korundů pro interval 60 min

Vzorky	Výbrus - 60 min	Tvrdost
Název	$\varnothing d[\text{mm}]$	HV 1
D220	0,50	1 810
T199R	0,50	1 790



T195R	0,60	1 503
Reynolds	0,70	1 850
D320	0,95	1 806



Diskuze výsledků:

Z obr. 4.5 a obr. 4.6 lze vyčíst, že nejodolnějším korundem proti opotřebení byl D220 (90 % Al_2O_3 + 10 % ZrO_2). Nejméně přijatelné výsledky byly prokázány u D320 (Al_2O_3 + TiC).

Ověření keramických vzorků:

Tabulka 4.7 – specifické hmotnosti testovaných materiálů

Vzorky	změřeno	udáno výrobcem
Název (složení)	g/cm ³	g/cm ³
D220 (90 % Al_2O_3 + 10 % ZrO_2)	4,06	4,00 až 4,10
T199R (99,2 % Al_2O_3)	3,89	3,87 až 3,92
T195R (95 % Al_2O_3)	3,84	3,83 až 3,90
Reynolds (99,96 % Al_2O_3)	3,93	3,90 až 3,99
TOSOH (ZrO_2 – stabilizovaný ytriem)	6,06	6,01 až 6,06
D420 (Si_3N_4)	3,21	3,18 až 3,24



D320 ($Al_2O_3 + TiC$)	4,22	4,18 až 4,23
--------------------------	------	--------------

Pravost vzorků ověřena přístrojem pro měření specifické hmotnosti **viz tab. 4.7**.

5 ZÁVĚR

S pomocí určené metodiky měření na přístroji kalotest byly určeny tribologické vlastnosti. Na základě těchto výsledků byly materiály vyhodnoceny. Nejlepší vlastnosti, které závisí na odolnosti proti opotřebení, prokazuje **kontaktní dvojice ocel ČSN 14 209 – keramický vzorek D220 (90 % Al_2O_3 + 10 % ZrO_2)**. Tento keramický materiál odolává opotřebení nejvíce. Experimentálně bylo ověřeno, že velikost opotřebení při stejném zatížení závisí na faktorech, jako je tvrdost a drsnost povrchu. Ocelová koule, která je ve fyzikálním kontaktu s keramikou, nemůže kvůli vysoké tvrdosti a vysoké jakosti povrchu keramického vzorku do něj vnikat, nebo z něj masivně odebírat jeho částice. Po delším působení dojde k částečnému odběru částic keramického materiálu a společně s částicemi oceli k vytvoření transferového filmu.

Materiály, které budou ve fyzikálním kontaktu, by měly mít co nejjakostnější povrch a vysokou tvrdost. Vysoce tvrdá oxidová keramika s převahou Al_2O_3 odolává opotřebení více než oxidová keramika s převahou ZrO_2 , nebo neoxidová keramika Si_3N_4 .

Přístroj kalotest byl pro ověření tribologických vlastností vyhodnocen jako použitelný, avšak pouze v případě, že bude pro tyto experimenty upraven. Kalotest v původní podobě není totiž přístroj určený ke stálému chodu za konstantních otáček. Unášivá hřídel kalotestu by měla být vyrobena z takového materiálu, který se nebude třením ocelové koule o hřídel opotřebovávat, ale přitom bude zaručena dobrá adheze a tedy přenos kroutícího momentu. Další podmínkou pro jeho použití je dostatečná tuhost konstrukce, která zamezí vzniku vibrací.

Vůbec velmi vhodné pro hodnocení tribologických vlastností by bylo doplnit kalotest o možnost měření v oblasti dynamiky, tj. usuzovat na velikost kroutícího momentu a tím k přímému zjištění koeficientu smykového tření mezi různými materiály jako základní tribologické vlastnosti. Tato úprava by mohla spočívat např. v možnosti měření úbytku elektrického proudu protékajícího elektromotorem sloužícím



pro pohon unášivého hřídele. Toto by se mohlo stát tématem pro další bakalářskou práci.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf (březen 2009)
2. <http://www.ateam.zcu.cz/download/rezna%20keramika08-09.pdf> (březen 2009)
3. http://www.benjamin.ic.cz/Hajek_rigo.pdf (březen 2009)
4. <http://www.ateam.zcu.cz/Metal2005Hajek.pdf> (březen 2009)
5. http://www.google.cz/search?as_q=3_vlastnosti&hl=cs&rlz=1W1ASUS_csCZ322CZ322&num=10&btnG=Vyhledat+Googlem&as_epq=&as_oq=&as_eq=&lr=&as_ft=i&as_filetype=ppt&as_qdr=all&as_occt=any&as_dt=i&as_sitesearch=&as_rights=&safe=images (březen 2009)
6. http://fei1.vsb.cz/kat453/www453/soubory/texty/ucebni_texty/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf (březen 2009)
7. <http://www.hanyko-praha.cz/slovnicek-pojmu/specifika-petrografie.htm> (březen 2009)
8. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Adheze> (březen 2009)
9. http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-9-C.pdf (březen 2009)
10. http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf (duben 2009)
11. http://www.google.cz/search?hl=cs&rlz=1W1ASUS_csCZ322CZ322&q=Vickers_ova+zkou%C5%A1ka+je+zalo%C5%BEena&btnG=Hledat&lr (duben 2009)



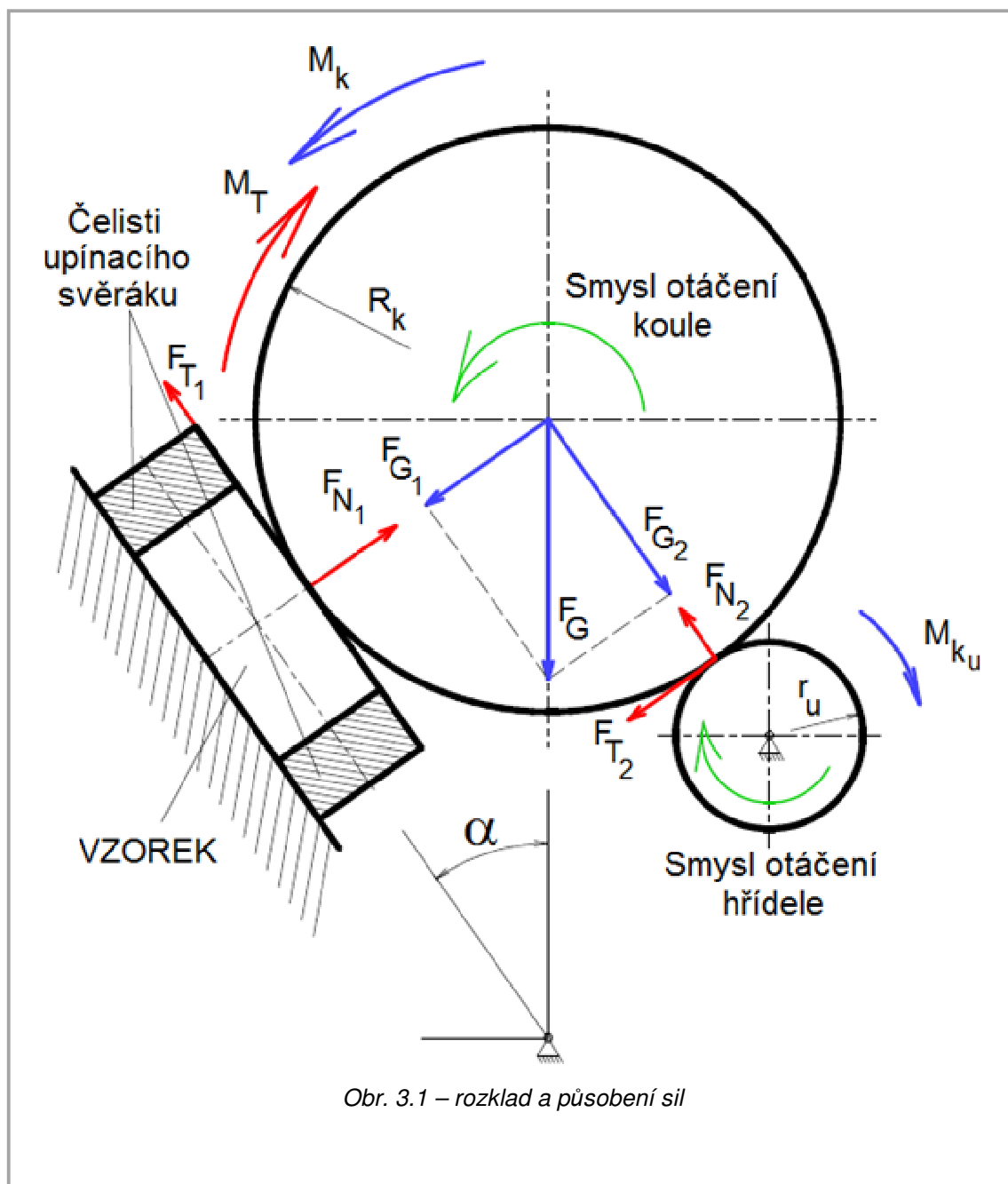
PŘÍLOHY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PŘÍLOHA 1 : ROZKLAD SIL, PŮSOBENÍ SIL

PŘÍLOHA 2 : VÝPOČET HLOUBKY A OBJEMU VÝBRUSU

PŘÍLOHA 1 : ROZKLAD SIL, PŮSOBENÍ SIL

Celková poloha konstrukce výrazně ovlivňuje rozklad sil. V této příloze bude ověřeno, v jaké poloze by se měl přístroj nacházet, pokud se bude používat k měření tribologických vlastností např. míry opotřebení. Výpočet bude vycházet z **obr 3.1** v kapitole 3.1.1.



Výpočet složek síly F_G (uvažujeme kouli č.4) pro různé úhly:

Pro $\alpha = 75^\circ$

$$F_{G1} = F_G \times \sin \alpha = 3,509 \times \sin 75^\circ = 3,389N$$

$$F_{G2} = F_G \times \cos \alpha = 3,509 \times \cos 75^\circ = 0,908N$$

Pro $\alpha = 60^\circ$

$$F_{G1} = F_G \times \sin \alpha = 3,509 \times \sin 60^\circ = 3,038N$$



$$F_{G2} = F_G \times \cos \alpha = 3,509 \times \cos 60^\circ = 1,7545 N$$

Pro $\alpha = 45^\circ$

$$F_{G1} = F_G \times \sin \alpha = 3,509 \times \sin 45^\circ = 2,481 N$$

$$F_{G2} = F_G \times \cos \alpha = 3,509 \times \cos 45^\circ = 2,481 N$$

Pro $\alpha = 35^\circ$

$$F_{G1} = F_G \times \sin \alpha = 3,509 \times \sin 35^\circ = 2,013 N$$

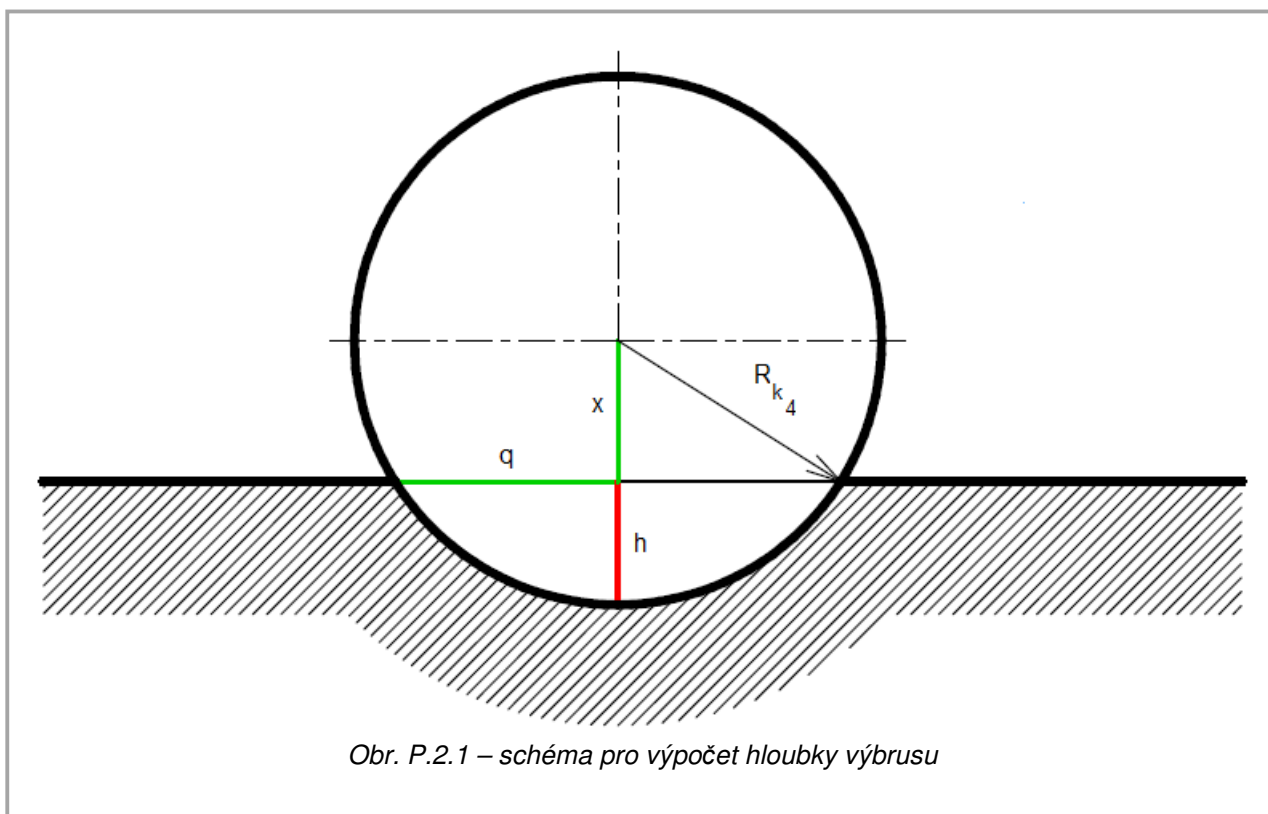
$$F_{G2} = F_G \times \cos \alpha = 3,509 \times \cos 35^\circ = 2,874 N$$

Diskuze výsledků:

V **kap. 3.1.1** byl zvolen jako optimální úhel mezi rovinou svěráku a svislou osou $\alpha = 35^\circ$, nejmenší úhel, který umožňuje konstrukce kalotestu. Tím dojde k nejvyšší možné reakci normálové síly F_{N2} , která zároveň způsobí zvětšení třecí síly F_{T2} , která působí mezi unášivým hřídelem a koulí a způsobuje přenos kroutícího momentu.

Z toho vyplývá, že se zvětšením třecí síly F_{T2} dojde ke snížení třecí síly F_{T1} , která působí na vzorek. To ovlivňuje proces opotřebení keramického vzorku – konkrétně časové intervaly experimentu.

PŘÍLOHA 2 : VÝPOČET HLOUBKY A OBJEMU VÝBRUSU



Výpočet hloubky výbrusu (uvažujeme kouli č.4):

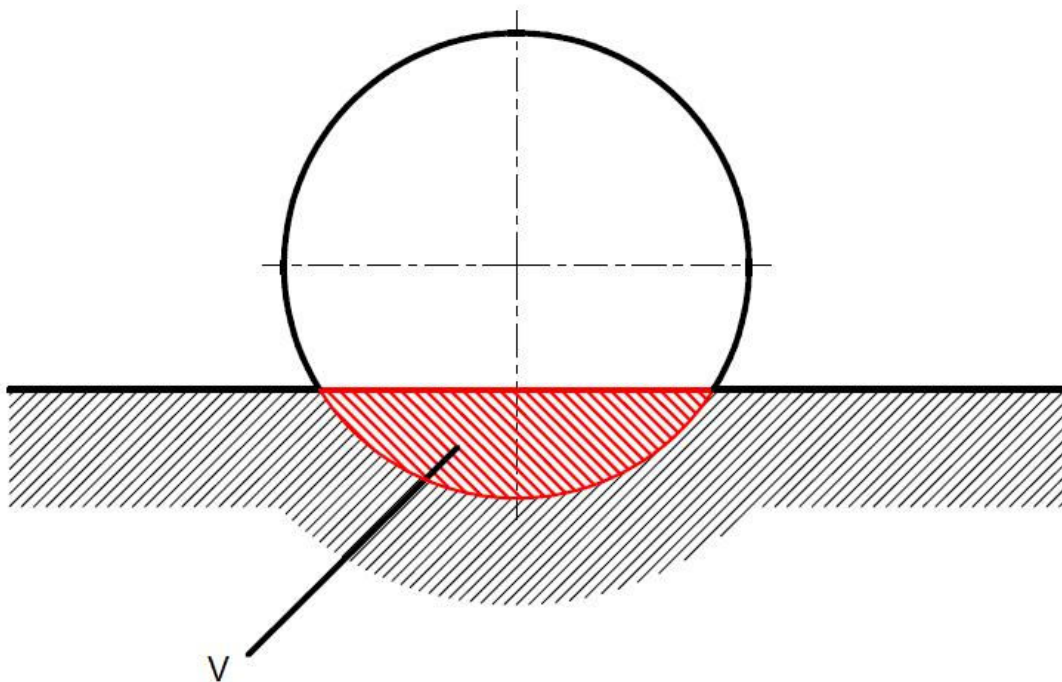
R_{k4} = poloměr koule č.4 [mm]

h = hloubka výbrusu
[mm]

q = polovina odečteného průměru výbrusu
[mm]

$$R_{k4} = h + x \Rightarrow h = R_{k4} - x \quad [\text{mm}]$$

$$x = \sqrt{R_{k4}^2 - q^2} \Rightarrow h = R_{k4} - \sqrt{R_{k4}^2 - q^2} \quad [\text{mm}]$$



Obr. P.2.2 – schéma pro výpočet objemu

Výpočet objemu výbrusu (uvažujeme kouli č.4):

h = vypočítaná hloubka výbrusu [mm]

q = polovina odečteného průměru výbrusu
[mm]

$$V = \frac{\pi \times h}{6} (3q^2 + h^2) \quad [\text{mm}^3]$$